

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة قاصدي مرباح ورقلة

Université Kasdi Merbah Ouargla

Faculté des Sciences Appliquées

Département de Génie Civil et Hydraulique



En vue de l'obtention du diplôme de Master Professionnel en Génie Civil

Spécialité : Etude et Contrôle des Bâtiments et Routes

Thème :

**Impact du renforcement en fibres de déchets plastiques sur les propriétés
mécaniques du béton bitumineux**

❖ Présenté et soutenue publiquement Par :

- BRAHIMI Mohammed Amine
- KAMASSI Abdelhak

Le 14/06/2025

Devant le jury composé de

:

KEBAILI Nabil	MCA	Université K.M Ouargla	Président
TALBI Med Abdallah	Docteur	Université K.M Ouargla	Examineur
MEZIANI Nedjma	MAA	Université K.M Ouargla	Encadreur
KCHIRED Ali	Ingénieur	Université K.M Ouargla	Co Encadreur

Année universitaire 2024/2025

Remerciements

*Nous tenons à remercier Madame **MEZIANI Nedjma** pour sa disponibilité et sa patience dans le suivi et la promotion de ce modeste travail.*

*On présent, également, nous remercions à l'ensemble des **enseignants** du département de génie civil et hydraulique, pour leurs soutien et conseils dans l'objectif de réussir notre travail.*

Nous vous remercie les membres de jury et aussi, Tous les proches qui ont participé à la réussite de notre projet, que ce soit sur le plan académique ou personnel.

Dédicaces

Nous dédions ce travail :

*À nos très chers ancêtres, et à nos parents
qui m'ont toujours encouragé, que Allah les
bénisse et les protège, ainsi qu'à nous frères
et sœurs, et nos familles et nos amis aussi.*

Résumé:

Cette étude vise à optimiser les performances mécaniques des bétons bitumineux en explorant différentes formulations, incluant l'incorporation de fibres plastiques recyclées. Plusieurs essais expérimentaux, tels que les tests Marshall, Duriez et de rigidité, ont été menés afin de comparer diverses compositions : un mélange témoin (B0), un mélange modifié au sable de dunes (B0-SD) et un autre contenant de la chaux (B0-CH). Les résultats obtenus révèlent que le mélange B0-SD, quant à lui, se démarque par ses performances globales améliorées : une stabilité accrue (13,64 kN), un fluage réduit (2,66 mm) et une charge maximale élevée (14,36 kN). L'incorporation de fibres plastiques recyclées, à des taux variant de 0,5 , 0,75 et 1 %, contribue à renforcer la stabilité et la résistance mécanique, bien qu'elle puisse induire une légère augmentation du fluage et une diminution de la compacité à des teneurs élevées. Le module de rigidité demeure supérieur à 7000 MP pour l'ensemble des formulations, bien qu'un léger affaiblissement soit observé avec l'ajout de fibres.

En conclusion, le mélange B0 enrichi à 0,5 % de fibres plastiques se révèle le plus performant, alliant durabilité, rigidité et résistance mécanique, tout en intégrant efficacement des matériaux recyclés dans une démarche coresponsable.

Mots clés: Fibres plastiques, Béton bitumineux, Performances mécaniques, Stabilité (Marshall), Formulations modifiées.

Abstract:

This study aims to optimize the mechanical performance of bituminous concrete by exploring various mix designs, including the incorporation of recycled plastic fibers. Several experimental tests—such as Marshall Stability, Durries, and stiffness tests—were conducted to compare different formulations: a control mix (B0), a mix modified with dune sand (B0-SD), and another containing lime (B0-CH). The results reveal that the B0-SD mixture stands out with its overall enhanced performance: increased stability (13.64 kN), reduced flow (2.66 mm), and higher maximum load capacity (14.36 kN). The incorporation of recycled plastic fibers, at contents ranging from 0.5, 0.75 and 1 %, contributes to improved stability and mechanical strength, although higher contents may lead to a slight increase in flow and a reduction in compactness. The stiffness modulus remains above 7000 MPa for all formulations, despite a slight decrease observed with the addition of fibers.

In conclusion, the B0 mix enriched with 0.5% recycled plastic fibers demonstrates the best overall performance, combining durability, rigidity, and mechanical resistance, while promoting an eco-responsible approach through the use of recycled materials.

Keywords: Plastic fibers, Bituminous concrete, Mechanical performance, Marshall Stability, Modified mixtures.

ملخص

تهدف هذه الدراسة إلى تحسين الأداء الميكانيكي للخرسانة الاسفلتية من خلال استكشاف تركيبات مختلفة، بما في ذلك دمج الألياف البلاستيكية المعاد تدويرها. تم إجراء عدة اختبارات تجريبية مثل اختبار مارشال اختبار دورياس واختبار معامل الصلابة، من أجل مقارنة تركيبات مختلفة: الخليط المرجعي (0B)، خليط معدل برمل الكتبان (B0-SD)، وآخر يحتوي على الجير (B0-CH). تكشف النتائج أن خليط B0-SD يتميز بأداء عام محسن حيث سجل استقرارًا مرتفعًا (13.64 كيلو نيوتن)، وانسيابية منخفضة (2.66 ملم)، وقدرة تحميل قصوى مرتفعة (14.36 كيلو نيوتن). يساهم إدماج الألياف البلاستيكية المعاد تدويرها، بنسب تتراوح بين 0.5% و 1%، في تعزيز الاستقرار والمقاومة الميكانيكية رغم أن النسب العالية قد تؤدي إلى زيادة طفيفة في الانسيابية وانخفاض في الكثافة. يظل معامل الصلابة أعلى من 7000 ميغاباسكال في جميع التركيبات، على الرغم من تسجيل انخفاض طفيف عند إضافة الألياف.

وفي الختام، يُظهر الخليط 0B المدعم بنسبة 0.5% من الألياف البلاستيكية أفضل أداء شامل، حيث يجمع بين المتانة، والصلابة، والمقاومة الميكانيكية، مع دمج فعال للمواد المعاد تدويرها ضمن نهج بيئي مستدام.

كلمات مفتاحية: الألياف البلاستيكية، الخرسانة الإسفلتية، تحسين الأداء الميكانيكي، ثبات مارشال، الخلطات المعدلة

Sommaire

Principales notations	I
Introduction Générale	2
Chapitre I : Généralités sur le béton bitumineux	
I.1. Introduction	6
I.2. Béton bitumineux	6
I.2.1. Définition.....	6
I.2.2. Historique du béton bitumineux	7
I.3. Composition de béton bitumineux.....	8
I.3.1. Les liants hydrocarbonés	8
I.3.1.1. Classification des liants hydrocarbonés.....	9
I.3.1.2. Essais de caractérisation des bitumes	12
I.3.1.3. Essai du point de ramollissement bille et anneau (NF EN 1427)	12
I.3.1.4. Densité relative (NF EN 15326).....	12
I.3.2. Granulats	12
I.4. Caractéristiques de béton bitumineux	13
I.5. Performances des enrobes bitumineux	15
I.6. Sable de dune.....	16
I.7. Béton bitumineux avec fibres	17
I.8. Déchets	18
I.9. Conclusion.....	19
Chapitre II : Matériels et matériaux	
II.1. Introduction	20
II.2. Granulats	20
II.2.1. Analyse granulométrique (NFP 18-554)	20
II.2.2. Mesure du coefficient d'aplatissement (NF EN933 -3 :2012).....	22
II.2.3. Analyse chimique (NF 15-461)	23
II.2.4. Propriété superficiel (NF P 18-591)	23
II.2.5. Los Anglos (NF EN 1097-2 :2020)	24
II.2.6. Micro deval (NF EN 1097-1 :2011)	25
II.2.7. Essai équivalent des sables (NF EN 933-8+A1)	26
II.2.8. Essai au bleu de méthylène (NF EN 933_9).....	26
II.2.9. Masse volumique (NF P18-301)	27
II.3. Caractéristique du liant utilise	29

II.4. Fibre de déchets plastiques.....	29
II.5. Conclusion.....	30
Chapitre III : Résultats et Interprétions	
III.1. Introduction	32
III.2. Etude de formulation	32
III.2.1. Composition granulaire	32
III.2.2. Détermination du mélange proposé.....	33
III.2.3. Formulation de béton témoin.....	34
III.3. Essai Marshall	36
III.3.1. Stabilité Marshall	37
III.3.2. Fluage Marshall.....	38
III.3.3. La charge Marshall.....	39
III.3.4. La compacité Marshall	40
III.4. Essai Duriez.....	40
III.4.1. Résistance à l'immersion à l'eau.....	41
III.4.3. Rapport d'immersion (r /R).....	42
III.5. Choix et modification la formulation du béton bitumineux 0/14	43
III.5.1. Stabilité Marshall	44
III.5.2. Fluage Marshall.....	44
III.5.3. La charge Marshall.....	45
III.5.4. La compacité Marshall	46
III.6. Formulation du béton bitumineux par déchets plastique.....	46
III.6.1. Evaluation des enrobés renforcés	47
III.6.1.1. Stabilité Marshall.....	47
III.6.1.2. Fluage Marshall.....	48
III.6.2. La compacité Marshall	49
III.7. Résultats d'essai de détermination du module de rigidité	50
III.8. Conclusion.....	53
Conclusion générale	86
Références bibliographiques	55
Liste les normes.....	57

Liste des figures

Chapitre I : Généralités sur le béton bitumineux

Figure I. 1 : Niveaux des essais des enrobés bitumineux.	16
Figure I. 2 : Propagation d'une fissure dans un matériau en état de service.	17

Chapitre II : Matériels et matériaux

Figures II.1 : les essais d'analyse granulométrique	20
Figures II 2: Différentes fractions des Courbe granulométrique.....	21

Chapitre III : Résultats et Interprétions

Figure III. 1 : Courbe granulométrique moyennes des différentes fractions.	32
Figure III. 2 : Courbe granulométrique du mélange proposé 0/14.	34
Figure III. 3 : Stabilité des mélanges mesurée par l'essai Marshall.	37
Figure III. 4 : Fluage des mélanges mesurée par l'essai Marshall.	38
Figure III. 5 : Charge des mélanges mesurée par l'essai Marshall.	39
Figure III. 6 : Densité théorique et apparente par mélange.	40
Figure III. 7 : Compacité des mélanges mesurée par l'essai Marshall.	40
Figure III. 8 : Résistance des mélanges mesurée par l'essai de Duriez après immersion dans l'eau. ...	41
Figure III. 9 : Résistance des mélanges mesurée par l'essai de Duriez à l'air libre.	42
Figure III. 10 : Rapport d'immersion.	42
Figure III. 11 : Courbe granulométrique du mélange modifié par sable de dunes (SD) et chaud (CH).44	
Figure III. 12 : Stabilité du mélange modifié mesurée par l'essai Marshall.....	44
Figure III. 13 : Fluage du mélange modifié mesurée par l'essai Marshall.	45
Figure III. 14 : Charge du mélange modifié mesurée par l'essai Marshall.	45
Figure III. 15 : Densité théorique et apparente par mélangemodifié.....	46
Figure III. 16 : Compacité du mélange modifié mesurée par l'essai Marshall.....	46
Figure III. 17 : Stabilité du béton bitumineux renforcé par déchet plastique.	48
Figure III. 18 : Fluage du béton bitumineux renforcé par déchet plastique.	48
Figure III. 19 : Densité théorique et apparente du béton bitumineux renforcé par déchet plastique.	49
Figure III. 20 : Compacité du béton bitumineux renforcé par déchet plastique.	50
Figure III. 21 : Évaluation du module de rigidité pour le béton fibré.	52

Liste des photos

Chapitre I : Généralités sur le béton bitumineux

- composition de béton bitumineux. 7
- Sables de dun de Sahara. 17

Chapitre II: Matériels et matériaux

PhotoII. 1 : Tamis pour d'analyse granulométrique.	21
Photo II. 2 : Tamis d'aplatissement.	22
Photo II. 3 : La machine los Angeles.	24
Photo II. 4 : La machine micro-Deval.	25
Photo II. 5 : Les outils de l'équivalent de sable.....	26
Photo II. 6 : Bleu de méthylène.	27
Photo II. 7 : Les outils utilisés pour mesurer la masse volumique apparente.....	28
Photo II. 8 : Les outils utilisés pour mesurer la masse volumique absolue.	28
Photo II. 9 : Les outils utilisés pour mesurer les caractéristiques du liant utilise.....	29
Photo II. 10 : Les fibres plastiques découpées.	30

Chapitre III: Résultats et Interprétions

Photo III. 1 : La masse volumique apparente par la méthode de la paraffine.	36
Photo III. 2 : Etapes de préparation du mélange bitumineux et éprouvettes.	37
Photo III. 3 : Opérations de compression et de mesure de l'épaisseur des éprouvettes Marshall à l'aide d'un pied à coulisse.	37
Photo III. 4 : Les outils utilisés pour l'essai de Duriez.....	41
Photo III. 5 : Formulation du béton bitumineux par déchets plastique.	47
Photo III. 6 : Appareil NAT	51

Liste des tableaux

Chapitre I : Généralités sur le béton bitumineux

Tableau I. 1 : Les classes granulaires.	13
--	----

Chapitre II : Matériels et matériaux

Tableau II. 1 : Résultats obtenus d'aplatissement.	23
Tableau II. 2 : Résultats obtenus d'analyse chimique.	23
Tableau II. 3 : Résultats propriété superficiel.....	24
Tableau II. 4: Résultats obtenus de Los Angeles.....	24
Tableau II. 5 : Résultats obtenus de Micro-Deval.....	25
Tableau II. 6 : Résultats obtenus d'équivalent de sable.	26
Tableau II. 7 : Résultats obtenus au bleu de méthylène.	27
Tableau II. 8 : Résultats de masse volumique apparente et absolue.....	28
Tableau II. 9 : Propriétés physiques des fibres plastiques utilisées.....	30

Chapitre II : Résultats et Interprétions

Tableau III. 1 : Pourcentages des compositions granulaires du mélange.	33
Tableau III. 3 : Fuseau de spécification du BBSG 0/14.	33
Tableau III. 4 : Pourcentage des éléments.....	35
Tableau III. 5 : Teneurs en liant et densité théorique de composition de béton témoin.	35
Tableau III. 7 : Pourcentages des compositions granulaires du mélange modifié.....	43
Tableau III. 8 : Nouvelles caractéristiques du béton bitumineux modifié.....	44

Classification majeures

BBM	Béton bitumineux mince.
BBTM	Béton bitumineux très mince
BBUM	Béton bitumineux ultra mince.
BBS	Béton bitumineux souple.
BBM	Béton bitumineux drainant.
BBSG	Béton Bitumineux Semi-Grenu.
BBME	Béton Bitumineux à Modules Élevés
LTPS	Laboratoire des Travaux publics du Sud
MDE	Micro-Dévala.
SM	Module de rigidité.
BB	Béton bitumineux.
LA	Coefficient de Los Angeles
ρ_s	Masse volumique absolue
ρ_{app}	Masse volumique apparent
TL	Teneur en liant
Σ	Surface spécifique
K	Module de richesse

Introduction générale

Introduction générale

Au fil de l'histoire, les infrastructures routières ont connu une évolution significative afin de répondre aux exigences croissantes en matière de transport, de commerce et de mobilité. Aujourd'hui, les routes constituent un élément essentiel du réseau de communication et de circulation, jouant un rôle vital dans le développement économique et social. L'amélioration des performances de ces infrastructures repose notamment sur l'utilisation de matériaux plus durables, tels que le bitume, ainsi que sur l'intégration des technologies modernes dans les processus de conception et de mise en œuvre.

Les propriétés du bitume varient selon la couche dans laquelle il est utilisé. En particulier, les couches de base doivent assurer une répartition efficace des charges sans provoquer de déformations excessives. Ces couches doivent posséder une bonne résistance à la fatigue, aux déformations permanentes, et faire preuve d'une cohésion suffisante. La formulation des mélanges bitumineux est une étape critique, car toute variation dans la composition peut affecter négativement certaines propriétés mécaniques et physiques du revêtement.

Dans le but d'améliorer la résistance des couches de roulement face aux sollicitations externes, telles que la chaleur, les chercheurs explorent différentes méthodes, notamment l'ajout de matériaux innovants ou la modification des liaisons internes des mélanges. Ces approches visent à accroître la durabilité et la performance des chaussées bitumineuses.

Dans ce contexte, la valorisation des déchets plastiques représente une solution innovante et durable. L'intégration de ces déchets dans le béton, qu'il soit ordinaire ou bitumineux, permet non seulement de réduire la quantité de plastiques envoyés en décharge, mais aussi de préserver les ressources naturelles, tout en offrant des avantages économiques notables. Plusieurs techniques de valorisation existent, telles que l'utilisation de granulats plastiques recyclés ou l'incorporation de fibres plastiques.

La présente étude a pour objectif d'évaluer l'impact de l'incorporation de fibres issues de déchets plastiques dans le béton bitumineux. Ces fibres seront incorporées aux pourcentages suivants : 0 %, 0,5 %, 0,75 % et 1 %. L'analyse est menée selon trois variantes : une formulation ordinaire, une formulation incluant du sable de dune, et une autre comportant de la chaux. L'objectif principal est d'analyser l'effet de ces ajouts sur les propriétés mécaniques des mélanges bitumineux, et ainsi d'évaluer leur potentiel d'utilisation dans les revêtements routiers durables.

Introduction générale

Afin de mener à bien cette étude, nous avons structuré notre travail en trois chapitres principaux :

Chapitre I : Ce chapitre fournit une vue d'ensemble sur les revêtements bitumineux, en abordant leurs caractéristiques générales ainsi qu'une étude détaillée de leurs compositions.

Chapitre II : Il est consacré à la caractérisation des matériaux utilisés et à l'analyse des compositions, en vue de sélectionner le béton bitumineux le plus adapté.

Chapitre III : Ce dernier chapitre présente les résultats obtenus, accompagnés d'explications et de commentaires permettant de mieux les interpréter.

Enfin, une conclusion générale résume les principaux résultats de l'étude et propose des pistes de développement à travers quelques recommandations.

Chapitre I :
Généralités
Sur le béton
bitumineux

I.1. Introduction

Le béton bitumineux est un matériau composite d'un mélange de granulats (sables, graviers, fines). Il est largement utilisé dans la réalisation des chaussées, des trottoirs et d'autres surfaces revêtues, en raison de sa durabilité, de sa résistance aux conditions climatiques et de sa capacité à supporter des charges de trafic élevées.

Malgré ses performances globalement satisfaisantes, ce matériau présente certaines limites, notamment l'apparition de fissures, le décollement, les déformations permanentes et la perte de cohésion. Pour pallier ces dégradations et améliorer la résistance à la fissuration, l'intégration de matériaux de renforcement, tels que les fibres, s'avère être une solution prometteuse. Ces fibres permettent de renforcer la matrice bitumineuse et de limiter la propagation des fissures, contribuant ainsi à une meilleure durabilité du revêtement.

Dans ce chapitre, nous nous intéresserons aux constituants fondamentaux du béton bitumineux ainsi qu'aux différentes approches permettant d'améliorer ses performances mécaniques et sa longévité.

I.2. Béton bitumineux

I.2.1. Définition

Le béton bitumineux, également appelé béton asphalteuse, est un matériau composite couramment utilisé pour le revêtement des routes, des pistes d'aéroports et des allées. Il se compose principalement de granulats (comme les graviers de différentes granulométries) et d'un liant hydrocarboné, généralement du bitume. Les granulats confèrent au mélange sa résistance mécanique, tandis que le bitume assure la cohésion et la viscosité de l'ensemble.

Chacun de ces deux composants possède des propriétés spécifiques, tant sur le plan rhéologique que mécanique. La connaissance approfondie de ces caractéristiques est essentielle pour formuler un enrobé bitumineux performant, répondant aux exigences de qualité et de durabilité requises pour les infrastructures routières. [1]



Photo I. 1 : Les éléments de béton bitumineux.

I.2.2. Historique du béton bitumineux

L'utilisation de l'asphalte en tant que matériau de construction remonte à plusieurs siècles. Dès 1595, lors de l'exploration du Nouveau Monde, les Européens découvrirent des gisements naturels d'asphalte. L'explorateur anglais Walter Raleigh décrit notamment une plaine d'asphalte située sur l'île de Trinité, près du Venezuela, et utilisa cet asphalte naturel pour l'étanchéité de ses navires. Au début du XIX^e siècle, les ingénieurs Thomas Telford et John Loudon McAdam jouèrent un rôle déterminant dans l'évolution des techniques de construction routière. Telford réalisa plus de 900 miles de routes en Écosse, en améliorant l'utilisation de pierres concassées. McAdam, quant à lui, introduisit une méthode de compactage de pierres concassées formant une surface dure, qui inspira par la suite le "tarmacadam" : un revêtement obtenu en liant les pierres avec du goudron chaud afin de réduire la poussière et l'entretien.[2]

En 1870, un tournant majeur eut lieu avec la pose du premier véritable revêtement en asphalte aux États-Unis, à Newark (New Jersey), par le chimiste belge Edmund J. De Smedt. Cette même période vit la création des premières usines centrales de production de mélange à chaud, initiée par la société Cummer. L'année suivante, Nathan B. Abbott de Brooklyn déposa le premier brevet relatif à l'asphalte. Au début du XX^e siècle, l'innovation se poursuit. En 1900, Frederick J. Warren obtient un brevet pour le revêtement « Bitulithic », un mélange de bitume et de granulats. En 1901, les frères Warren construisent la première installation moderne d'asphalte à East Cambridge (Massachusetts). En 1907, la production d'asphalte raffiné issu du pétrole dépasse celle de l'asphalte naturel, ouvrant la voie à une industrialisation accrue. La mécanisation de la mise en œuvre commence avec l'apparition de mélangeurs à tambour et de répondeuses mécaniques.[3]

Durant la Seconde Guerre mondiale (1942), les besoins militaires accélèrent les avancées technologiques, en particulier pour supporter les charges importantes des avions

militaires. En 1955, la fondation de la National Bituminous Concrete Association (devenue plus tard la National Asphalt Pavement Association) marque un pas vers la normalisation et l'amélioration de la qualité, grâce notamment à des programmes de recherche menés dans les universités et laboratoires. L'année 1956 constitue un jalon important avec l'adoption par le Congrès américain de la Loi sur les autoroutes interétatiques, allouant 51 milliards de dollars pour la construction de routes. Cette période voit l'émergence de nombreuses innovations telles que les commandes de nivellement électroniques, les finisseurs extra-larges capables de paver plusieurs voies à la fois, et les rouleaux vibrants à roues en acier.

Enfin, en 2002, l'Agence de protection de l'environnement (EPA) retire les usines d'asphalte de la liste des industries classées comme sources majeures de polluants atmosphériques dangereux, reconnaissant ainsi les progrès réalisés en matière de respect de l'environnement.[4]

I.3. Composition de béton bitumineux

L'enrobé bitumineux est un matériau composite principalement constitué d'un liant hydrocarboné (généralement du bitume) et de granulats minéraux. Ces deux composants jouent un rôle complémentaire : les granulats assurent la résistance mécanique de la structure, tandis que le liant confère cohésion et imperméabilité à l'ensemble du mélange.

I.3.1. Les liants hydrocarbonés

Les liants hydrocarbonés sont des produits obtenus principalement par distillation du pétrole brut ou de la houille (charbon minéral).

Le terme « liant » fait référence à la fonction de colle qu'ils assurent, tandis que l'adjectif « hydrocarboné » indique que ces matériaux sont essentiellement composés d'atomes de carbone et d'hydrogène. On distingue deux grandes familles de liants hydrocarbonés : les goudrons et les bitumes [5].

L'utilisation des liants hydrocarbonés a évolué au fil des décennies selon les avancées technologiques et les exigences en matière de performance [5] :

- ❖ 1900–1930 : utilisation prédominante des goudrons de houille ;
- ❖ 1930–1950 : apparition des émulsions de bitume ;
- ❖ Jusqu'en 1970 : généralisation des bitumes purs ;
- ❖ Années 1970 : développement des bitumes modifiés par polymères ;
- ❖ Années 1980 : introduction des liants modifiés et des additifs ;

Chapitre I : Généralités sur le béton bitumineux

- ❖ Années 1990 : émergence des bitumes spéciaux, adaptés à des conditions d'utilisation spécifiques.

a) Goudron

Le goudron est un sous-produit obtenu par distillation sèche, c'est-à-dire un chauffage à haute température en l'absence d'air, de différents combustibles. On distingue plusieurs types de goudrons selon l'origine du combustible utilisé :

- ❖ Goudrons d'origine végétale ;
- ❖ Goudrons d'origine fossilifère ;
- ❖ Goudrons d'origine sédimentaire.

Bien qu'il ait été largement utilisé au début du XX^e siècle, son usage a diminué en raison de sa toxicité et de son instabilité à long terme.[6]

b) Bitume

Le bitume est un mélange complexe d'hydrocarbures dérivés de la distillation du pétrole brut. Sa composition chimique varie selon la provenance du pétrole utilisé. À température ambiante, il se présente sous forme de solide inerte, mais lorsqu'il est chauffé, il devient un liquide visqueux et adhésif, ce qui le rend particulièrement adapté aux applications routières.

Le choix d'un bitume dépend de plusieurs critères :

- ❖ Ses propriétés de déformation ;
- ❖ Ses caractéristiques adhésives ;
- ❖ Sa durabilité dans le temps ;
- ❖ Sa stabilité aux températures ambiantes.

Les bitumes sont généralement classés selon leur grade, qui représente l'évolution de leur viscosité en fonction de la température. [7]

I.3.1.1. Classification des liants hydrocarbonés

Selon la norme européenne EN 12 597,[8] les liants hydrocarbonés sont classés en deux grandes catégories :

Chapitre I : Généralités sur le béton bitumineux

- ❖ Les liants bitumineux, qui incluent les liants ou mélanges de liants et de granulats contenant du bitume ;
- ❖ Les liants à base de goudron, dont l'usage est aujourd'hui très limité en raison de leur toxicité.

Les liants bitumineux sont à leur tour classés en fonction de l'origine du bitume :

- Bitume naturel (provenant de gisements naturels) ;
- Bitume dérivé du pétrole (issu de la distillation du pétrole brut).

Les bitumes d'origine pétrolière peuvent être différenciés selon leur structure chimique (bitumes purs, modifiés, etc.) ainsi que selon leur domaine d'application (enrobés à chaud, à froid, étanchéité, etc.). [9]

❖ Selon leur structure

Bitumes purs : également appelés bitumes routiers durs, sont obtenus par le raffinage du pétrole brut. Leur classification repose principalement sur l'essai de pénétrabilité à l'aiguille, réalisé à une température standard (généralement 25 °C). Cet essai permet de déterminer la consistance du bitume, exprimée en dixièmes de millimètre, en mesurant la profondeur de pénétration d'une aiguille sous charge normale pendant un temps donné. Les bitumes sont ainsi désignés par des plages de pénétrabilité, par exemple :

- 20/30 : bitume très dur ;
- 40/50, 60/70 : bitumes de consistance moyenne ;
- 80/100 : bitume plus tendre, adapté aux climats froids ou aux formulations spécifiques.

Bitume fluidifié (Cut-back) : également appelé cut-back, est un bitume dont la viscosité a été réduite par l'ajout d'un diluant volatil, tel que du pétrole léger ou du kérosène. Cette réduction temporaire de viscosité facilite l'application du liant à température ambiante ou modérée. Une fois appliqué, le diluant s'évapore, permettant au bitume de retrouver progressivement ses propriétés d'origine. Les bitumes fluidifiés sont principalement utilisés pour :

- ❖ Les couches de scellement ;
- ❖ Les couches d'accrochage.

Chapitre I : Généralités sur le béton bitumineux

Cependant, en raison de leur impact environnemental (émission de composés organiques volatils lors de l'évaporation du solvant), leur usage tend à être remplacé par des solutions plus écologiques, telles que les émulsions de bitume.[10]

Bitume fluxé : est un bitume auquel on a ajouté une huile de fluxage, généralement moins volatile que les solvants utilisés dans les bitumes fluidifiés (cut-backs). Cette huile permet de réduire la viscosité du bitume de manière plus durable, facilitant ainsi sa mise en œuvre à température modérée tout en prolongeant le temps de maniabilité du matériau.

Bitume modifié : est un liant bitumineux dont les propriétés rhéologiques (comportement visqueux et élastique) ont été améliorées ou ajustées par l'ajout d'agents chimiques, le plus souvent des polymères (tels que les SBS – styrène-butadiène-styrène, ou les EVA – éthylène-acétate de vinyle).[11]

❖ Selon leur usage

Bitume routier : utilisé pour enrober les granulats destinés à la construction et à l'entretien des routes ainsi que des infrastructures similaires.

Bitume industriel : en opposition au bitume routier, le bitume industriel est utilisé dans des applications autres que celles liées à la construction et à l'entretien des infrastructures routières et assimilées.

Viscosité : est une propriété physique qui décrit la résistance d'un fluide à l'écoulement, résultant des forces d'interaction entre ses molécules. Elle dépend de plusieurs facteurs, parmi lesquels la température joue un rôle déterminant.[12]

Adhésivité : lors de l'utilisation du bitume pour la fabrication de chaussées, l'adhésion du bitume aux granulats constitue l'une des propriétés essentielles recherchées pour assurer la stabilité et la durabilité de l'infrastructure.

Vieillessement : le vieillissement du bitume se manifeste par la dégradation progressive de certaines de ses caractéristiques au fil du temps, parmi lesquelles la propriété de cohésion est l'une des plus déterminantes.

Cohésivité : est une propriété fondamentale qui permet au bitume de maintenir son intégrité structurelle, empêchant ainsi sa séparation excessive. Elle permet au matériau de s'étirer sans se défaire, garantissant ainsi sa résistance et sa durabilité dans les applications routières.[13]

I.3.1.2. Essais de caractérisation des bitumes

L'essai de pénétrabilité permet d'évaluer la consistance des bitumes et des liants bitumineux. Cette méthode consiste à mesurer la profondeur de pénétration verticale d'une aiguille de référence dans un échantillon de matériau, exprimée en dixièmes de millimètre, sous des conditions opératoires spécifiques. Les paramètres de l'essai sont les suivants :

- ❖ Température maintenue à 25°C ;
- ❖ Charge appliquée de 100 g ;
- ❖ Durée d'application de la charge fixée à 5 secondes.

I.3.1.3. Essai du point de ramollissement bille et anneau (NF EN 1427)

L'essai du point de ramollissement consiste à déterminer la température à laquelle le bitume passe de l'état solide à l'état liquide. Pour cela, un anneau en cuivre est rempli de bitume, et une bille en acier est placée au-dessus. L'ensemble est ensuite immergé dans de l'eau, et la température est augmentée de 5°C par minute. La température de ramollissement est définie comme celle à laquelle la bille entraîne le bitume, faisant descendre le matériau dans l'anneau jusqu'au fond du récipient.[14]

I.3.1.4. Densité relative (NF EN 15326)

Par définition, la densité relative correspond au rapport entre la masse d'un volume donné d'un matériau et la masse d'un volume équivalent d'eau, les deux étant à une température spécifiée. Ainsi, une densité relative de 1,032 indique que le matériau est 1,032 fois plus lourd que l'eau à la température indiquée. [15]

I.3.2. Granulats

Les granulats désignent un ensemble de particules dont la taille varie entre 0 et 80 mm. Ces matériaux granulaires constituent environ 95 % de la masse de l'enrobé, représentant 80 à 85 % de son volume. Cette prédominance des composants minéraux influence de manière significative les propriétés mécaniques et les performances du matériau bitumineux. À l'instar des sols, les granulats sont classés selon divers essais en laboratoire. La granularité désigne la distribution dimensionnelle des particules d'un granulat, et elle reflète la répartition pondérale des granulats élémentaires dans les matériaux étudiés. Elle est représentée graphiquement en utilisant les ouvertures des tamis en abscisse et les pourcentages cumulés

Chapitre I : Généralités sur le béton bitumineux

des particules retenues en ordonnée. Les granulats sont classés en différentes catégories granulaires, basées sur la taille des éléments. Une classe granulaire, notée (d/D), est définie par la taille du grain le plus petit "d" et du grain le plus gros "D", exprimée en millimètres. Il est accepté qu'une fraction granulaire puisse contenir jusqu'à 15 % de matériaux excédentaires de taille supérieure.[16]

Tableau I. 1 : Les classes granulaires.[16]

Appellation	Notation	Dimension
Les fines	0/D	$D \leq 0,080 \text{ mm}$
Les sables	0/D	$D \leq 6,6 \text{ mm}$
Les gravillons	d/D	$d \geq 2 \text{ mm}$ et $D \leq 31,5 \text{ mm}$
Les cailloux	d/D	$d \geq 20 \text{ mm}$ et $D \leq 80 \text{ mm}$
Les graves	0/D	$6,3 \text{ mm} < D \leq 80 \text{ mm}$

I.3.2.1. Rôle des granulats dans les enrobés bitumineux

Les granulats utilisés dans les enrobés, notamment en couche de roulement, jouent un rôle essentiel dans le mécanisme d'adhérence entre les pneumatiques et la chaussée. Sous l'effet du trafic, les granulats en surface ont tendance à se polir à des vitesses variables selon leur nature pétrographique et leur composition minéralogique. Il est donc impératif que les granulats destinés à la fabrication des enrobés bitumineux répondent à des exigences de qualité strictes ainsi qu'à des caractéristiques techniques adaptées à leur usage spécifique. [17]

Filler d'apport : le filler est constitué de particules très fines, dont le diamètre est inférieur à 80 microns. Il est généralement issu du dépoussiérage des granulats ou obtenu par broyage industriel de roches. En raison de sa surface spécifique très élevée, le filler absorbe une quantité importante de liant. Le mélange du filler avec le liant forme un mastic qui joue un rôle crucial dans la stabilité de l'enrobé. L'épaisseur du film de ce mastic est évaluée à travers un paramètre appelé le module de richesse. La qualité du filler, notamment sa propreté et sa faible teneur en éléments argileux, est essentielle pour assurer un bon comportement mécanique du mélange. Par ailleurs, la disposition des différentes classes granulaires permet de définir la courbe granulométrique d'un mélange bitumineux, élément fondamental pour ses performances. [18]

I.4. Caractéristiques de béton bitumineux

Béton bitumineux (BB) : est un mélange à granularité continue, composé de gravillons, de sable, de filler, de liant bitumineux, ainsi que d'éventuels additifs. Ce type de matériau est principalement destiné à la réalisation des couches de roulement et de liaison

Chapitre I : Généralités sur le béton bitumineux

dans les structures de chaussées. Il se caractérise par une courbe granulométrique typique, généralement de type 0/10 ou 0/14, et par une teneur en liant relativement élevée, souvent supérieure ou égale à 5.

Grave-bitume (GB) : est un mélange bitumineux à structure granulaire continue, principalement utilisé pour la réalisation des couches de base et de fondation dans les structures routières. Elle présente une granulométrie typique de 0/14 ou 0/20 mm et contient généralement entre 4 % et 4,5 % de liant bitumineux. Ce type de formulation vise à assurer une bonne portance et une résistance mécanique adaptée aux sollicitations du trafic routier.[19]

Sable bitumineux :est un mélange composé d'un ou de plusieurs types de sable associés à du bitume pur. Afin d'optimiser ses propriétés, ce mélange requiert généralement l'ajout de fines. Celles-ci peuvent provenir soit des sous-produits du concassage et du broyage (tels que les sables de carrières ou les fines calcaires), soit de matériaux pulvérulents d'origine industrielle, tels que la chaux ou le ciment. Ce type de formulation est utilisé pour des applications spécifiques où une granulométrie fine est requise.[19]

Béton bitumineux mince (BBM) :est un mélange à granularité continue, généralement de type 0/10 ou 0/14. Il se caractérise par sa facilité de compactage et son excellente imperméabilité. Principalement utilisé pour la réalisation de revêtements de faible épaisseur, tels que les parkings, les trottoirs ou les voies à faible trafic, ce matériau est mis en œuvre sur des épaisseurs variant généralement entre 2,5 et 5 cm. [19]

Béton bitumineux très mince (BBTM) : constitue une solution particulièrement avantageuse en termes de rapport qualité-prix. Il offre une bonne durabilité ainsi qu'une grande facilité de mise en œuvre. Indépendamment de la granularité utilisée (0/10 ou 0/6), le BBTM est appliqué en couches de faible épaisseur, généralement comprises entre 1,5 et 3 cm. [14]

Béton bitumineux ultra mince (BBUM) :est spécifiquement conçu pour constituer la couche de roulement, en contact direct avec les pneumatiques des véhicules. Il est particulièrement adapté aux surfaces telles que les parkings. Ce type d'enrobé est mis en œuvre en très faible épaisseur, généralement comprise entre 1 et 1,5 cm.

Béton bitumineux souple (BBS) :est formulé à partir d'un liant bitumineux à consistance relativement faible, ce qui confère à l'enrobé une capacité de déformation accrue.

Chapitre I : Généralités sur le béton bitumineux

Cette souplesse le rend adapté à certains contextes spécifiques, toutefois, elle s'accompagne d'une résistance limitée à l'orniérage.

Béton bitumineux drainant (BBDR) : se distingue par sa capacité à offrir une excellente adhérence en toutes conditions climatiques, qu'il s'agisse de pluie ou de fortes chaleurs. Grâce à sa structure ouverte, il permet également de réduire significativement le bruit de roulement. Ces caractéristiques en font une solution particulièrement adaptée aux aménagements tels que les allées de jardin ou les voies à faible trafic.[19]

Béton bitumineux semi-grenu (BBSG) : constitue l'enrobé à chaud de référence dans de nombreux projets d'aménagement. Grâce à sa polyvalence, il convient aussi bien aux trottoirs qu'aux allées, et peut supporter des trafics de moyenne à forte intensité. Son épaisseur de mise en œuvre varie généralement entre 3 et 9 cm, en fonction de la granularité choisie.

Bétons bitumineux à module élevé (BBME) : sont élaborés à partir d'un mélange de bitume pur ou modifié et de granulats, préparés en centrale d'enrobage. Ils se distinguent par un module de rigidité « E » nettement supérieur à celui des enrobés bitumineux classiques, ce qui leur confère une excellente résistance à l'orniérage. Principalement utilisés pour la réalisation des couches de roulement sur les routes nationales et régionales soumises à un trafic moyen à dense, les BBME assurent une performance mécanique accrue. Ils sont mis en œuvre sur des épaisseurs comprises entre 5 et 7 cm pour les formulations BBME 0/10, et entre 6 et 9 cm pour les BBME 0/14.[20]

I.5. Performances des enrobés bitumineux

L'enrobé bitumineux constitue un matériau composite constitué d'un mélange de granulats (notamment des graves, sables et fines) et d'un liant hydrocarboné. Le rôle principal du liant est d'assurer la cohésion de l'ensemble, tandis que le squelette minéral, formé par les granulats, confère à l'enrobé sa rigidité. Les propriétés mécaniques de ce matériau peuvent être déterminées à partir d'essais de laboratoire réalisés sous des conditions de température et de sollicitations spécifiques, sur des échantillons préparés en laboratoire ou prélevés directement sur la chaussée. La formulation de ces mélanges nécessite une étude approfondie prenant en compte plusieurs paramètres, tels que la courbe granulométrique, la compacité, l'angularité des granulats, le type de bitume utilisé, ainsi que la teneur en liant et en fines. L'essai Marshall est couramment employé pour déterminer la teneur optimale en bitume dans des échantillons cylindriques de 101,6 mm de diamètre et 63,5 mm de hauteur. Ce test permet

Chapitre I : Généralités sur le béton bitumineux

de mesurer la résistance, dite stabilité Marshall, ainsi que la déformation, désignée sous le terme de fluage, et d'évaluer la compacité des échantillons après leur compactage.[21]

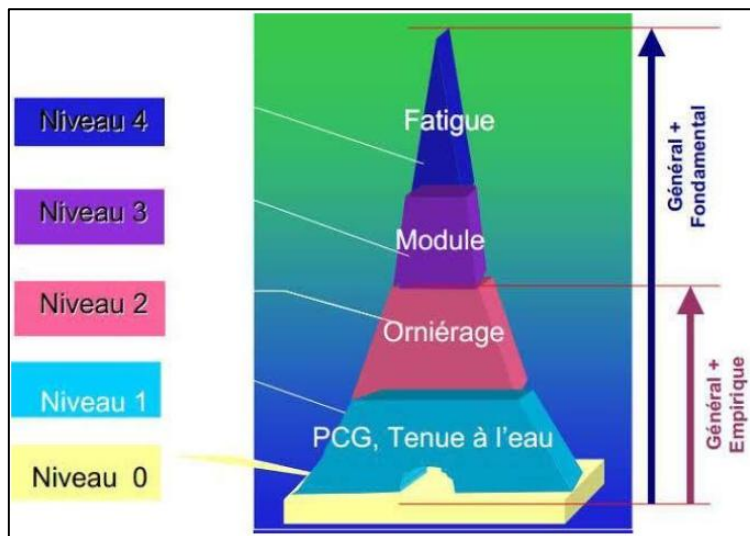


Figure I. 1 : Niveaux des essais des enrobés bitumineux.

I.6. Sable de dune

Les sables rencontrés dans les dunes mouvantes sont constitués majoritairement de particules siliceuses, caractérisées par une granulométrie relativement uniforme et de faible dimension. Ces matériaux s'accumulent sous forme de dunes dont les hauteurs peuvent varier considérablement. Selon les travaux de Foxés et Higginbotham (1968), cités par Ben Dhia (1998), la composition géographique du Sahara se répartit approximativement comme suit : 40 % de montagnes désertiques, 15 % de plaines désertiques et 30 % de dunes de sable, le reste étant constitué de sebkhas, de chotts et d'autres formations. Couvrant près du tiers de la superficie du continent africain, le Sahara représente une région stratégique où les enjeux liés au développement des infrastructures routières sont particulièrement importants. Cette répartition met en évidence la nécessité de valoriser les ressources locales, notamment le sable, dans les projets de construction routière en milieu saharien, où les matériaux traditionnels peuvent faire défaut.



Photo I. 2 : Sables de dune de Sahara.

I.7. Béton bitumineux avec fibres

Le secteur de la construction constitue un domaine en constante évolution, où l'innovation technologique occupe une place centrale, notamment en ce qui concerne le développement de nouveaux matériaux et procédés. La recherche actuelle se concentre sur la mise au point de solutions écologiques, performantes et économiquement viables pour répondre aux exigences croissantes des projets d'infrastructure. Parmi ces solutions, l'incorporation de fibres dans les matériaux de construction est étudiée depuis plusieurs décennies en raison de ses nombreuses propriétés avantageuses. Initialement, l'ajout de fibres au béton bitumineux visait à améliorer ses performances mécaniques, notamment sa résistance à la compression et à la traction. Toutefois, les progrès technologiques ont permis le développement de techniques avancées offrant des niveaux de performance élevés à des coûts maîtrisés. Les recherches menées ont permis de démontrer que l'incorporation de fibres peut contribuer de manière significative à deux aspects essentiels : la limitation de la propagation des fissures par la réduction de leur ouverture, et la transformation du comportement fragile d'un matériau en un comportement plus ductile.[21]

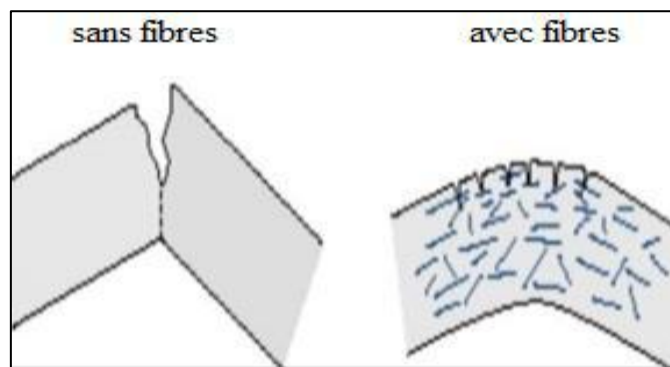


Figure I. 2 : Propagation d'une fissure dans un matériau en état de service.

I.8. Déchets

La valorisation des déchets dans le domaine du génie civil représente un enjeu majeur, notamment en raison des exigences de qualité souvent moins strictes que dans d'autres secteurs industriels. Le recyclage des déchets présente un double intérêt : d'une part, il permet de réduire l'impact environnemental lié à l'accumulation des déchets ; d'autre part, il contribue à abaisser les coûts de production des matériaux de construction. Ainsi, de nombreux pays intègrent divers types de déchets dans les formulations de béton, que ce soit sous forme de poudre, de fibres ou d'agréats.

Types de déchets

Il existe plusieurs types de déchets susceptibles d'être valorisés dans le domaine du génie civil. On peut notamment citer :

Les recyclables : Grâce aux récentes avancées dans le secteur industriel, il est aujourd'hui admis que la majorité des matériaux peuvent potentiellement être recyclés, sous réserve de choix stratégiques et de considérations économiques appropriées. Toutefois, dans une perspective opérationnelle, on qualifie de recyclables les matériaux dont la récupération et la valorisation peuvent être réalisées de manière efficace, à un moment donné et dans un contexte technique et économique favorable. Parmi les matériaux couramment considérés comme recyclables dans ce cadre, on peut citer le papier, le carton et les boîtes en aluminium, en raison de la maturité des filières de recyclage qui leur sont associées et de leur rentabilité environnementale et économique.[9]

Les déchets plastiques : est un matériau polymère synthétique obtenu par la polymérisation de monomères dérivés de la pétrochimie, associés à divers additifs chimiques. Ce matériau, largement utilisé à l'échelle mondiale, pose aujourd'hui un sérieux problème environnemental en raison de sa faible biodégradabilité et de l'accumulation croissante de ses déchets dans les milieux naturels. Les plastiques peuvent être classés selon plusieurs critères, notamment leur structure moléculaire, leurs interactions intermoléculaires, leur comportement thermique, ainsi que les procédés de transformation ou de conservation. Sur cette base, on distingue principalement deux grandes familles : les plastiques thermoplastiques, qui ramollissent sous l'effet de la chaleur et peuvent être remodelés, et les plastiques thermodurcissables, qui conservent leur forme après durcissement et ne peuvent pas être remoulés.

Le verre : est principalement constitué de silice, de calcaire et de cendre de soude. Cette composition lui confère des propriétés remarquables telles que la transparence, la résistance mécanique et chimique, ainsi qu'une bonne capacité d'isolation face aux variations climatiques et aux agents agressifs.[10]

I.9. Conclusion

Le béton bitumineux constitue un composant essentiel dans la réalisation des différentes couches de revêtement routier, contribuant significativement à l'amélioration de la qualité structurale et à l'augmentation de la durabilité des chaussées. Parmi les évolutions majeures dans ce domaine figure le béton bitumineux à haute performance, qui offre des propriétés mécaniques et fonctionnelles renforcées. Toutefois, malgré ses performances accrues, ce type de revêtement demeure vulnérable à la fissuration, en particulier sous l'effet des contraintes de traction induites par les variations thermiques.

Dans cette optique, l'incorporation de fibres dans les mélanges bitumineux a suscité un intérêt croissant, en raison de leurs propriétés d'adhésion et de compatibilité élevées avec la matrice bitumineuse, permettant ainsi une amélioration notable du comportement mécanique du matériau. La présente étude vise à évaluer l'effet de l'ajout de fibres sur les performances du béton bitumineux, en mettant l'accent sur leur compatibilité avec la matrice ainsi que sur l'évolution de ses propriétés mécaniques. Le choix s'est porté sur des fibres plastiques recyclées, en raison de leurs avantages économiques et de leur contribution significative à la réduction de l'empreinte environnementale des matériaux de construction.

Chapitre II :
Matériels
Et
Matériaux

II.1. Introduction

Ce chapitre fournit une description approfondie des matériaux employés dans le cadre de cette recherche, en particulier le sable de Dun et les additifs plastiques. Les caractéristiques physiques et mécaniques de ces matériaux ont été déterminées à l'aide d'une série d'essais en laboratoire. Ces matériaux ont ensuite été intégrés dans la composition de deux types de bétons bitumineux : un béton bitumineux semi-grenu de formulation classique, et un béton modifié comprenant du sable de dune traité, de la chaux, ainsi que des plastiques recyclés. L'objectif principal de cette démarche est d'améliorer les propriétés mécaniques, la résistance aux déformations permanentes

II.2. Granulats

Les granulats utilisés dans le cadre de cette étude pour la formulation d'un béton bitumineux de type 0/14 se composent de trois fractions granulométriques : la fraction 0/3, fournie par la Société Nationale des Travaux Publics (SNTTP), et les fractions 3/8 et 8/15, issues de la région de Batna (Aïn Touta). À cela s'ajoute le sable de dunes collecté dans la région de Sidi Khouiled (wilaya de Ouargla). L'ensemble de ces matériaux a fait l'objet d'une série d'essais et d'analyses en laboratoire en vue de caractériser leurs propriétés physiques et mécaniques.

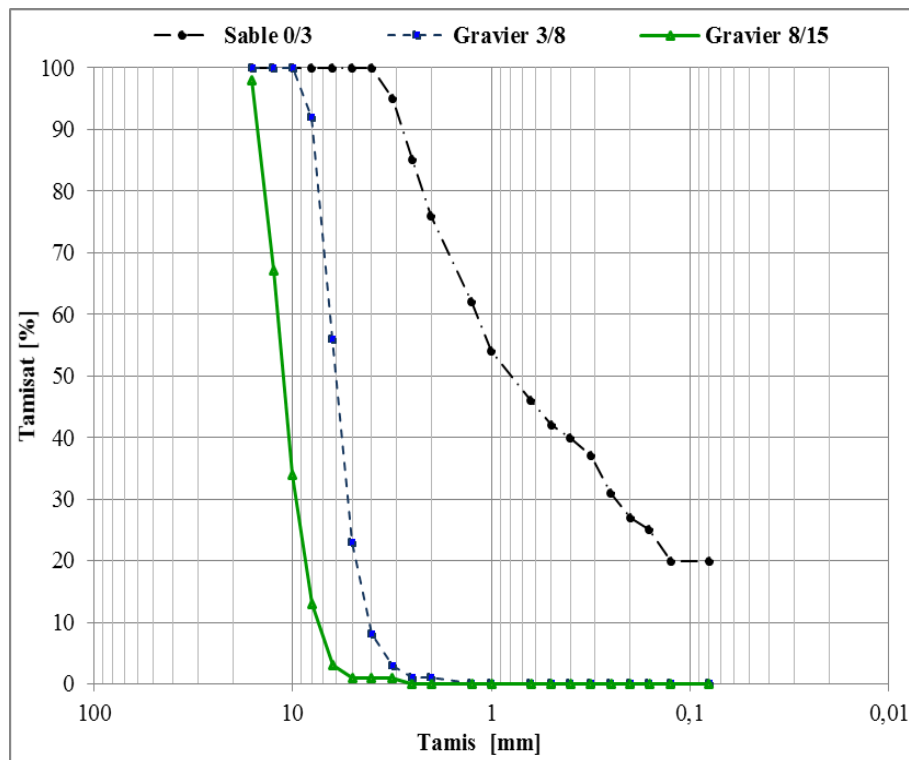
II.2.1. Analyse granulométrique (NFP 18-554)

L'analyse granulométrique vise à déterminer la répartition pondérale des particules constituant un matériau en fonction de leur dimension, en recourant à la méthode de tamisage. À cette fin, un échantillon préalablement pesé est introduit dans une colonne composée de tamis à mailles décroissantes, disposés de manière hiérarchique, du plus grand diamètre en haut au plus petit en bas. Afin de limiter la dispersion des poussières, l'ensemble est hermétiquement couvert. La colonne est ensuite soumise à une série de secousses vibratoires standardisées, permettant ainsi la séparation progressive des particules selon leur taille.



Photo II.1 : les essais d'analyse granulométrique.

Les résultats des essais d'analyse granulométrique sont présentés dans les Tableaux 2.1 et 2.2 (Annexe) et La Figures II.2 et II.1, les quels synthétisent les répartitions granulométriques obtenues pour les différents matériaux étudiés.



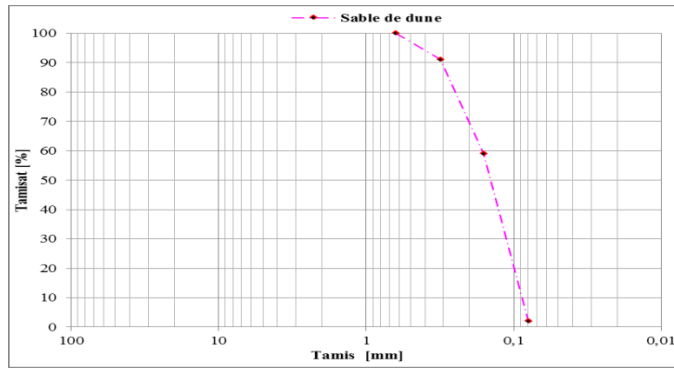


Figure II. 2 : granulométriques de sable de dune.

II.2.2. Le coefficient d'aplatissement (NF EN933 -3 :2012)

La détermination du coefficient d'aplatissement constitue l'un des essais fondamentaux pour évaluer la morphologie des granulats. En effet, les granulats à forte proportion de particules plates sont généralement jugés inadaptés à la fabrication du béton ou des enrobés bitumineux, en raison de leurs effets défavorables sur la compacité et la résistance mécanique des matériaux. L'essai repose sur le tamisage des refus de chaque fraction granulométrique, issues d'une analyse granulométrique préalable, à travers une grille métallique dont l'écartement E entre les barres est normé.



Photo II. 2: Tamis d'aplatissement.

Le coefficient d'aplatissement global A est donné par:

$$A = \frac{\sum M_e}{\sum M_G} * 100$$

$\sum M_e$: la somme des poids passants à travers la grille à fente.

$\sum M_G$: la somme des poids de refus partiel.

Chapitre II : Matériels et matériaux

Tableau II. 1 : Résultats obtenus d'aplatissement.

Classe	3/8	8 /15	Observation
Aplatissement(%)	26,47	12	Inférieur à 20%

Pour la classe granulométrique 8/15, et 3/8 présente un coefficient d'aplatissement supérieur à la limite tolérée ($A > 20 \%$), traduisant une proportion significative de grains à forme plate, ce qui peut compromettre la qualité des matériaux élaborés. En revanche, la fraction 8/15 affiche un coefficient d'aplatissement inférieur au seuil critique ($A < 20 \%$), ce qui indique une morphologie granulaire conforme selon les normes applicable

II.2.3. Analyse chimique (NF 15-461)

L'analyse chimique des granulats vise à déterminer les teneurs en carbonates, en éléments insolubles ainsi qu'en sulfates (SO_3). Ces essais sont essentiels pour évaluer la compatibilité des granulats entre eux, ainsi qu'avec le liant utilisé, afin d'assurer la durabilité et la performance des matériaux composites. Le tableau ci-dessous présente les pourcentages des principaux constituants chimiques des granulats étudiés.

Tableau II. 2 : Résultats obtenus d'analyse chimique.

Paramètre analysé	Résultat	Observation
%anhydride sulfate (SO_3)	0,44	$\leq 0,7$
%Ions chlorures (Cl^-)	0,009	Bétons Non Armé : 1% Bétons Armé : 0,65% Béton précontraint : 0,2%
%carbonates (CaCO_3)	91	-
% Insolubles	5,3	-

Selon la composition chimique, les résultats sont bons.

II.2.4. Propriétés superficielle (NF P 18-591)

La norme NF P 18-591 établit la méthode de référence pour l'évaluation des propriétés superficielles des granulats dont la dimension est supérieure à 2 mm. Cet essai a pour objectif de quantifier la présence de particules fines, notamment argileuses, susceptibles d'adhérer à la surface des granulats ou d'y être intimement mélangées. Les résultats obtenus dans le cadre de cet essai sont présentés dans le tableau suivant :

Chapitre II : Matériels et matériaux

Tableau II. 3 : les propriétés superficielles

Gravier	3/8	8/15	Observation
PS(%)	0,8	0,41	≤ 2

Selon les résultats acceptables pour les graviers

II.2.5. Los Angeles (NF EN 1097-2 :2020)

L'objectif de cet essai est d'évaluer la résistance des granulats à la fragmentation lorsqu'ils sont soumis à des chocs répétés. Cette résistance est déterminée en mesurant la proportion de particules de dimension inférieure à 1,6 mm générées après le passage des granulats dans la machine Los Angeles, où ils sont impactés par des billes en acier normalisées. Cet essai fournit ainsi une indication fiable de la durabilité et de la résistance mécanique des granulats face aux sollicitations dynamiques auxquelles ils peuvent être exposés en service.



Photo II. 1 : machine los Angeles.

Le coefficient Los Angeles (LA) est donné par le rapport :

$$LA = (5000 - m) / 5000 \times 100$$

LA : Coefficient de Los Angeles ;

m: Masse du refus sur tamis 1,6 mm.

Tableau II. 4: Résultats obtenus de Los Angeles.

Classes	10/14	Observation
LA (%)	23,06	≤ 25

La résistance à l'usure du mélange est jugée satisfaisante, conformément aux exigences normatives qui imposent une valeur du coefficient Los Angeles inférieure à 25 ($LA < 25$).

II.2.6. Micro dévale (NF EN 1097-1 :2011)

L'objectif de cet essai est d'évaluer la résistance des granulats à l'usure par frottement. Cette évaluation repose sur la quantification des particules de taille inférieure à 1,6 mm générées lors du frottement réciproque des granulats à l'intérieur d'un cylindre en rotation, selon des conditions d'essai normalisées. L'essai est généralement réalisé en présence d'eau, mais il peut également être conduit à sec, en fonction des spécifications requises.



Photo II. 2 : La machine micro-Derval.

$$\text{MDE} = \frac{500 - m}{500} \times 100$$

MDE : Coefficient micro-Deval ;

m : Masse du refus sur tamis 1,6 mm.

Tableau II. 5 : Résultats obtenus de Micro-Derval.

Classes	8/15	Observation
MDE(%)	13,4	≤ 20

La résistance à la corrosion du mélange est considérée comme acceptable, conformément aux normes fixant la limite du coefficient MDE à une valeur inférieure à 20 (MDE < 20).

II.2.7. Essai équivalent des sables (NF EN 933-8+A1)

L'équivalent de sable est déterminé à l'aide de la formule ci-dessous. Cet essai permet d'évaluer la propreté du sable en mesurant la teneur en éléments fins, en particulier les particules argileuses, susceptibles d'affecter la qualité du matériau.

$$ES = \frac{h_2}{h_1} \times 100$$

ES: Coefficient d'équivalent de sable ;

h_2 : Hauteur de sédiment ;

h_1 : Hauteur de sédiment + flocculat.



Photo II. 3: la détermination de l'équivalent de sable.

Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau II. 6 : Résultats obtenus d'équivalent de sable.

Echantillon	Sable de dune	Sable concasse (0/3)
ES (%)	91,2	63,25

D'après les résultats on a un sable de dunes très propre et sable concasse légèrement argileux

II.2.8. Essai bleu de méthylène(NF EN 933_9)

La valeur de l'indice au bleu de méthylène est déterminée à l'aide de la formule suivante :



Photo II. 4 : Bleu de méthylène.

Avec : V : est le volume bleu ajoutée en cm^3 ; $V_B = \frac{V}{m} \times 10$

m : est la masse sèche de la prise sèche en g.

Tableau II. 7 : Résultats obtenus au bleu de méthylène.

Classe	0/3	Observation
VBS	1,6	<2

II.2.9. Masse volumique (NF P18-301)

- a) **Masse volumique apparente** : La masse volumique apparente (ρ_{app}) d'un matériau correspond à la masse d'un mètre cube de ce matériau à l'état meuble, incluant les vides internes (perméables et imperméables) des particules ainsi que le vide inter granulaires. Elle est généralement exprimée en (g/cm^3 , kg/m^3 ou encore t/m^3), selon le contexte d'utilisation.

$$\rho_{app} = M/V_a$$

ρ_{app} : la masse volumique apparente (g/cm^3) ;

M : la masse de l'échantillon (g) ;

V_a : volume apparent de l'échantillon (cm^3).

Chapitre II : Matériels et matériaux



Photo II. 5 : Les mesurer de la masse volumique apparente.

b) Masse volumique absolue: La masse volumique absolue correspond à la masse par unité de volume de la matière constituant le granulat, en excluant totalement les vides internes ou inter granulaires. Elle représente donc la densité intrinsèque du matériau et s'exprime généralement en (g/cm^3 ou kg/m^3 ...).

$$\rho_s = M_2 / (M_1 + M_2 - M_3)$$

ρ_s : la masse volumique absolu (g/cm^3) ;

M_1 : poids de récipient plein d'eau (g) ;

M_2 : poids sec d'échantillon en (g) ;

M_3 : poids de récipient + échantillon + eau en (g).



Photo II. 6 : Les mesurer de la masse volumique absolue.

Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau ci-après

Tableau II. 8: Le Résultats de la masse volumique apparente et absolue.

Echantillon	8/15	3/8	0/3	SD	Chaux
$\rho_{app} (g/cm^3)$	1,25	1,25	1,38	1,48	1,30
$\rho_s (g/cm^3)$	2,68	2,67	2,57	2,66	2,75

II.3. Caractéristique du liant utilise

Le liant utilisé dans le cadre de ce projet est un bitume de type 40/50, fourni par l'unité NAFTAL. Afin de caractériser ses propriétés physico-chimiques, trois essais d'identification ont été réalisés au laboratoire LTPS. Ces essais sont les suivants :

- ✚ Pénétrabilité (1/10 mm) ;
- ✚ Point de ramollissement (°C) ;
- ✚ Densité (g/cm^3).



Photo II. 7 : Les outils utilisés pour mesurer les caractéristiques du liant utilise.

Les données expérimentales issues des essais sont consignées dans le tableau suivant: (Annexe)

II.4. Fibre de déchets plastiques

Les fibres utilisées dans cette étude sont des fibres plastiques issues du recyclage de déchets industriels, en l'occurrence des corps de serrage utilisés dans l'emballage de divers produits (voir Figure II.9). Le choix de ce type de fibres s'inscrit dans une démarche de valorisation des déchets et de réduction de l'impact environnemental, conformément aux principes du développement durable.



Photo II. 8 : Les fibres plastiques découpées.

Chapitre II : Matériels et matériaux

Les propriétés physiques des fibres utilisées dans cette étude sont récapitulées dans le tableau ci-dessous :

Tableau II. 9 : Propriétés physiques des fibres plastiques utilisées.

Densité(g /cm ³)	Longueur(mm)	Largeur(mm)	Epaisseur(mm)
1,24	30	1	0,5

II.5. Conclusion

Ce chapitre a permis, à travers l'analyse des propriétés physiques et mécaniques des matériaux utilisés ainsi que l'évaluation de leurs performances dans différentes formulations de bétons bitumineux, de mieux appréhender l'impact de l'incorporation du sable de dune traité, de la chaux et de fibres plastiques recyclées sur la qualité du mélange. Les résultats obtenus suggèrent que l'intégration de ces matériaux alternatifs peut améliorer la résistance aux déformations et renforcer la durabilité des enrobés bitumineux, notamment dans des contextes climatiques sévères. Ces conclusions encouragent la poursuite de recherches approfondies en vue d'optimiser leur utilisation dans une perspective de développement d'infrastructures routières durables.

Chapitre III :
Résultats
Et
Interprétation

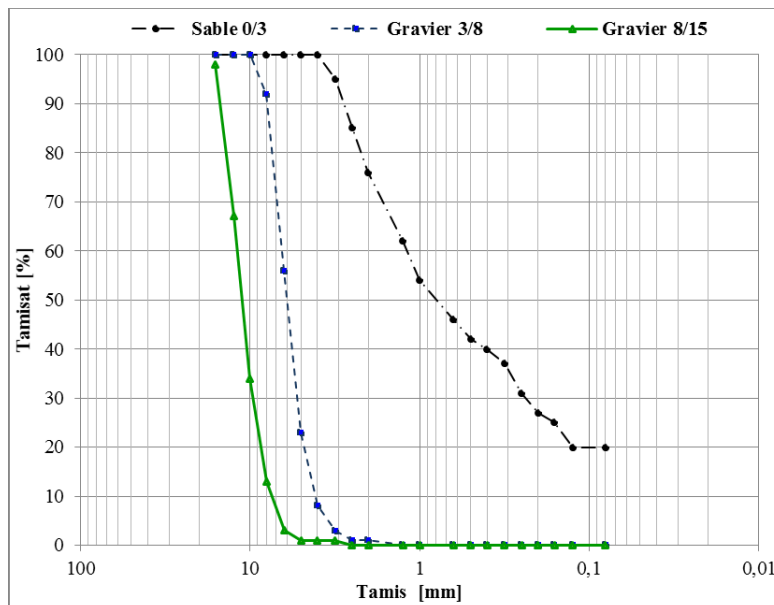
III.1. Introduction

Ce chapitre aborde les aspects pratiques de la préparation du béton bitumineux, en détaillant la méthodologie adoptée ainsi qu'une série d'essais indispensables à l'évaluation des propriétés de la formulation. Parmi ces essais figurent l'essai Marshall, utilisé pour déterminer la stabilité et la compacité du mélange ; l'essai Duriez, qui permet d'apprécier la résistance à l'eau ; et l'essai du module de rigidité, destiné à mesurer la résistance du matériau aux déformations sous l'effet de charges répétées. L'ensemble de ces tests vise à identifier la formulation optimale, garantissant à la fois performance et durabilité dans le cadre des applications routières.

III.2. Etude de formulation

III.2.1. Composition granulaire

Dans le cadre de cette étude, un béton bitumineux semi-grenu (BBSG) de classe granulaire 0/14 a été sélectionné. Ce mélange est composé de trois fractions granulaires bien définies : 0/3, 3/8 et 8/15. La courbe granulométrique cible du mélange est obtenue par la combinaison des courbes granulométriques moyennes de ces trois fractions, conformément aux normes techniques en vigueur.



Chapitre III : Résultats et Interprétation

À partir des courbes granulométriques moyennes des différentes fractions, les pourcentages en poids de chaque type de granulat ont été déterminés de manière à respecter les normes de courbe granulométrique de référence 0/14. Cette démarche a permis d'obtenir une composition équilibrée, conforme aux spécifications techniques en matière de granulométrie. La composition granulométrique proposée du mélange est présentée dans le tableau ci-après, illustrant la répartition pondérale de chaque fraction dans la formulation finale.

Tableau III. 1: Pourcentages des compositions granulaires du mélange.

Fractions	Sable 0/3	Gravier 3/8	Gravier 8/15	Total
Pourcentage des constituants (%)	43	22	35	100

III.2.2. Détermination du mélange proposé

Le mélange proposé est calculé à l'aide de la formule suivante, qui permet de déterminer la courbe granulométrique théorique du mélange à partir des contributions pondérales de chaque fraction granulaire :

$$\text{Mélange proposé} = \frac{\text{Tamisé} \times \text{pourcentage de granulat}}{100}$$

Cette formule permet d'obtenir la courbe granulométrique finale en combinant les courbes individuelles des différentes fractions, selon les proportions pondérales préalablement définies. Les valeurs correspondant au mélange proposé, résultant de ce calcul, sont présentées dans le tableau suivant. (Annexe)

Ce tableau illustre la granulométrie cible du béton bitumineux à travers les pourcentages passants cumulés pour chaque tamis, en accord avec le fuseau granulométrique de référence 0/14.

Tableau III. 2 : Normes de courbe spécification du BBSG 0/14.

Tamis (mm)	Tamisait (%)	Fuseau (%)	
		Min	Max
14	99	94	100
10	77	72	84
6,3	56	50	66
4	45	40	54
2	37	28	40
0,315	17	11	18
0,08	10	7	10

Chapitre III : Résultats et Interprétation

La figure suivante présente la courbe granulométrique du mélange proposé 0/14, obtenue à partir des proportions calculées pour chaque fraction granulaire. Elle permet de visualiser la conformité du mélange avec le fuseau granulométrique de référence et d'évaluer l'homogénéité de la répartition des particules.

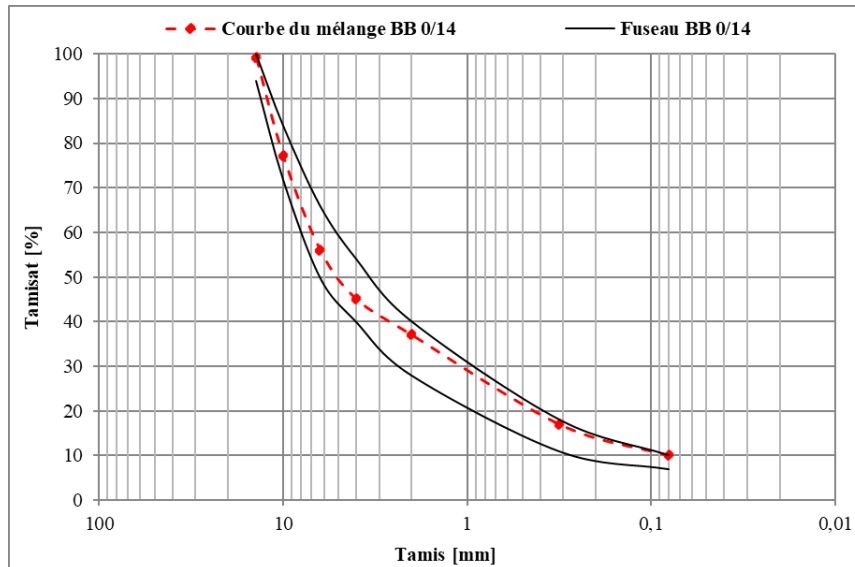


Figure III. 2 : Courbe granulométrique du mélange proposé 0/14.

III.2.3. Formulation de béton témoin:

La méthodologie algérienne de formulation des enrobés bitumineux recommande l'essai Marshall pour évaluer leur résistance. Les éprouvettes, de forme cylindrique, ont un diamètre de 101,6 mm et une hauteur de 63,5 mm. Elles sont compactées par 50 coups sur chaque face à une température de 160 °C, conformément à la norme en vigueur. Après une journée de conservation à température ambiante, les éprouvettes sont immergées dans un bain-marie à 60°C pendant 40 minutes. La stabilité Marshall est définie comme la force maximale enregistrée lors de l'essai, exprimée en (kN), tandis que le fluage correspond à la déformation de l'éprouvette à cette force maximale, mesurée en (mm).

❖ Calcul du Coefficient Correcteur α

En appliquant la formule suivante:

$$\alpha = \frac{2.65}{MVRg}$$

Avec :

$$MVRg = [(2.68 \times 0.35) + (2.67 \times 0.22) + (2.57 \times 0.43)] = 2.635$$

$$\text{Donc : } \alpha = 1.007$$

Chapitre III : Résultats et Interprétation

❖ Calcul le Surface Spécifique des Agrégats Σ

$$\Sigma = (0.25G + 2.3S + 12s + 135f)/100$$

Avec :

- G : pourcentage de refus supérieur ou égal à 6,3 mm ;
- S : Pourcentage de refus compris entre 0,315 mm et 6,3 mm ;
- s : Pourcentage de refus compris entre 0,08 mm et 0,315 mm ;
- f : Pourcentage de passant à 0,08 mm.

Tableau III. 3 : Pourcentage des éléments.

Coefficient	G	S	s	f
Pourcentage (%)	43.63	27.54	18.94	8.60

$$\Sigma = 14.96 \text{ m}^2/\text{kg}$$

$$\Sigma = \sqrt[5]{14.96} = 1.72$$

Les valeurs de teneur en liant et densité théorique de composition de béton témoin sont définies par le tableau suivant :

Tableau III. 4 : Teneurs en liant et densité théorique de béton témoin.

	B0-K1	B0-K2	B0-K3
K	3.3	3.4	3.65
Teneur en liant	5.72	5.89	6.32
Densité théorique [g/cm³]	2.43	2.42	2.41

La compacité, ou densité relative, représente le rapport entre la densité apparente obtenue après compactage et la densité réelle du mélange bitumineux. Cette densité peut être déterminée selon deux méthodes :

- ❖ Méthode de la pesée hydrostatique, basée sur le principe d'Archimède ;
- ❖ Méthode de l'enrobage à la paraffine.

Dans cette étude, la méthode de l'enrobage à la paraffine a été retenue. Elle consiste à recouvrir l'éprouvette d'une fine couche de paraffine afin d'empêcher l'infiltration d'eau dans les vides internes de l'échantillon. Après cela, l'éprouvette est pesée à l'air libre puis immergée dans l'eau pour permettre un calcul précis de la masse volumique apparente à partir de la différence de poids dans les deux milieux.

Chapitre III : Résultats et Interprétation

La formule utilise pour calculer la compacité est suivante :

$$C\% = \frac{\text{Densité apparente}}{\text{Densité théorique}} \times 100$$

$$\text{Avec : Densité théorique} = \frac{100 + \text{Bitume}\%}{\frac{0/3\%}{\rho(0/3)} + \frac{3/8\%}{\rho(\frac{3}{8})} + \frac{8/15\%}{\rho(\frac{8}{15})} + \frac{\text{Bitume}\%}{\rho(\text{Bitume})}}$$



Photo III. 1: La masse volumique apparente par la méthode de la paraffine.

III.3. Essai Marshall

Cet essai vise à évaluer deux caractéristiques fondamentales des enrobés bitumineux : la résistance à la compression et la densité du mélange. Ces paramètres sont déterminants pour assurer la qualité, la durabilité et les performances des revêtements routiers. Mis au point par Bruce Marshall en 1939, ce procédé est aujourd'hui encadré par plusieurs normes techniques, dont la norme européenne EN 12697-34.

L'essai se déroule en plusieurs étapes principales : l'éprouvette est d'abord compactée conformément aux normes en vigueur, puis immergée dans un bain-marie à 60 °C pendant 40 minutes. Elle est ensuite placée dans une presse Marshall, où une force de compression diamétrale est appliquée à une vitesse constante de 50 mm/min jusqu'à la rupture de l'échantillon. Cette méthode permet ainsi de simuler les conditions réelles du terrain et d'évaluer le comportement mécanique des enrobés, contribuant à garantir la fiabilité des infrastructures routières.



Photo III. 2 : Etapes de préparation du mélange bitumineux et éprouvettes.



Photo III. 3 : Opérations de compression et de mesure de l'épaisseur des éprouvettes Marshall à l'aide d'un pied à coulisse.

Après avoir réalisé l'essai de compression sur les éprouvettes préparées conformément aux conditions décrites précédemment, les principales caractéristiques obtenues à l'issue de l'essai Marshall sur les mélanges bitumineux sont les Stabilité Marshall, Fluage Marshall et la Compacité Marshall.

III.3.1. Stabilité Marshall

Il s'agit de l'effort maximal de rupture exprimé en, (KN) atteint par l'éprouvette lors de la compression. Celle-ci est comprimée suivant une génératrice à l'intérieur d'un moule d'écrasement, à l'aide d'une presse dont la vitesse d'avancement est réglée à 0,85 mm/s. Les résultats sont traces dans la figure suivante :

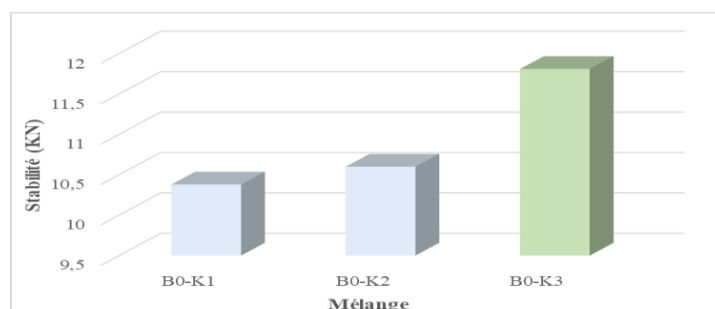


Figure III. 3: Stabilité du l'essai Marshall.

La figure III.3 illustre la stabilité des bétons témoins en fonction du module de richesse pour les formulations B0-K1, B0-K2 et B0-K3. Les résultats obtenus satisfont les exigences des normes en vigueur pour les travaux routiers pour B0-K2 et B0-K3, avec des valeurs de stabilité supérieures à 10,5 kN. On observe que le béton B0-K3 présente la meilleure stabilité parmi les différentes formulations, avec des gains respectifs de 12 % et 10 % par rapport aux bétons B0-K1 et B0-K2. Cette amélioration peut être attribuée à l'effet de la correction apportée, qui renforce la cohésion et l'adhérence entre les constituants du squelette granulaire et le liant, contribuant ainsi à une meilleure résistance globale du mélange.

III.3.2. Fluage Marshall

L'affaissement correspond à la déformation mesurée, en dixième de millimètre (1/10 mm), de l'éprouvette au moment de la rupture. La compacité, quant à elle, est évaluée à l'aide de l'essai Marshall, qui permet de déterminer l'évolution de la densification de l'enrobé en fonction de l'énergie de compactage appliquée. Cet essai est essentiel pour analyser le comportement du matériau sous des conditions de charge similaires à celles rencontrées en service.

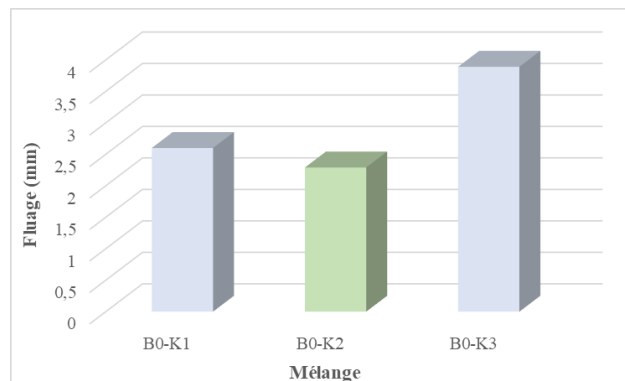


Figure III. 4 : Fluage des mélanges mesurée par l'essai Marshall.

La figure III.4 présente les résultats de fluage pour les différents bétons réalisés : B0-K1, B0-K2 et B0-K3. Parmi ces formulations, le mélange B0-K2 affiche les meilleures performances, avec une valeur minimale de fluage de 2,29 mm. On observe une réduction du fluage pour B0-K2 par rapport aux bétons B0-K1 et B0-K3, avec des diminutions respectives de 12 % et 41 %. Il est également important de souligner que l'ensemble des résultats reste conforme aux exigences des spécifications pour les enrobés, qui imposent une valeur maximale de fluage inférieure à 4 mm.

III.3.3. Les charges du Marshall

D'après les résultats présentés dans la figure III.5, le mélange B0-K3 affiche la meilleure performance en termes de charge maximale, avec une valeur estimée à 12,99 kN. Cette performance est supérieure à celles observées pour les mélanges B0-K1 et B0-K2, confirmant ainsi l'efficacité de la formulation B0-K3 en termes de résistance mécanique.

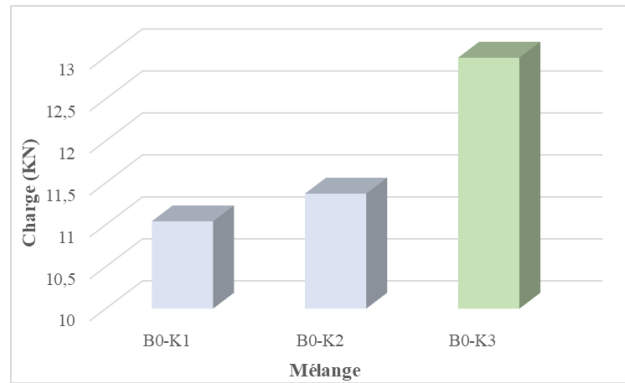


Figure III. 5 : Les charges des mélanges mesurés par l'essai Marshall.

D'un autre côté, on peut également remarquer que le béton B0-K3 présente une augmentation notable de la charge maximale par rapport aux formulations B0-K1 et B0-K2, avec des hausses respectives de 15 % et 13 %. Cette amélioration peut s'expliquer par l'optimisation des procédés de fabrication, le choix de matériaux de qualité ainsi que le respect rigoureux des normes techniques en vigueur. Ces facteurs contribuent ensemble à renforcer la résistance mécanique des revêtements en béton bitumineux.

III.3.4. Densité théorique et apparente

Dans les trois cas, la densité apparente est inférieure à la densité théorique, ce qui traduit la présence d'une certaine porosité dans le matériau.

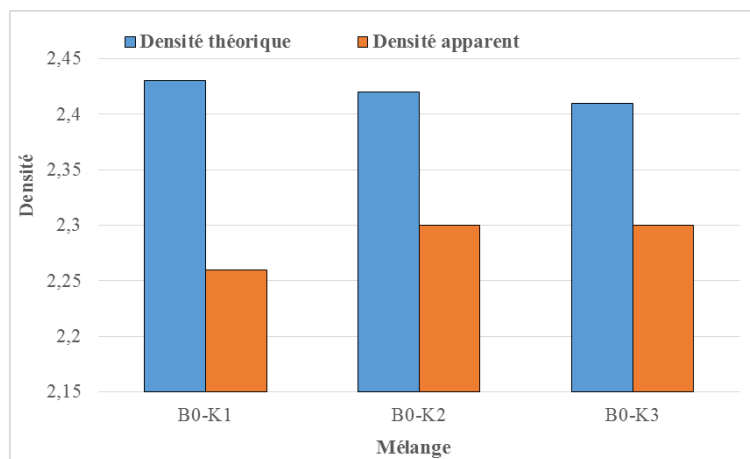


Figure III. 6: Densité théorique et apparente par mélange.

L'analyse des densités révèle que le matériau étudié est globalement bien compacté, bien que de faibles porosités persistent. Les taux de compacité élevés (supérieurs à 93 %) indiquent une bonne qualité du procédé de fabrication ou de préparation des échantillons.

III.3.5. La compacité Marshall

Selon la figure III.7, les résultats indiquent que les mélanges B0-K3 et B0-K2 présentent une compacité supérieure à celle du mélange B0-K1.

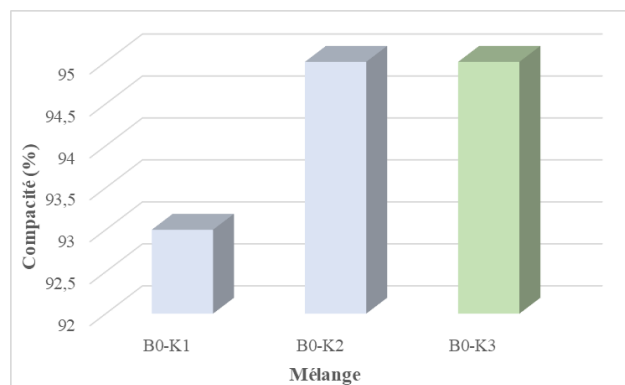


Figure III. 7 : Compacité des mélanges mesurée par l'essai Marshall.

Après analyse complète des données issues de l'essai Marshall, une teneur en bitume de 6,33 % a été retenue, car elle offre les meilleures performances en termes des propriétés recherchées pour les enrobés.

III.4. Essai Duriez

Cet essai a pour objectif d'évaluer la résistance à l'eau des enrobés bitumineux en mesurant la diminution de leur résistance à la compression après une immersion de 7 jours. Des éprouvettes d'enrobés renforcés par des fibres, préparées en laboratoire à l'aide de la presse Duriez, ont été soumises à cet essai afin de déterminer leur résistance à la compression à l'air libre ainsi que leur comportement après immersion. Les éprouvettes sont immergées dans un bain d'eau maintenu à 18 °C (voir photo III.4), tandis qu'un autre groupe est conservé à l'air libre à la même température. Cette température relativement basse permet d'analyser le comportement des enrobés dans un état essentiellement élastique, puisqu'elle est inférieure à la température de début d'amollissement (TBA).



Photo III. 4: L'essai de Duriez.

III.4.1. Résistance à l'immersion à l'eau

La figure III.8 présente les résultats obtenus pour la résistance à la compression après immersion dans l'eau. Le meilleur résultat est obtenu avec le mélange B0-K3, affichant une valeur estimée à 99 bar.

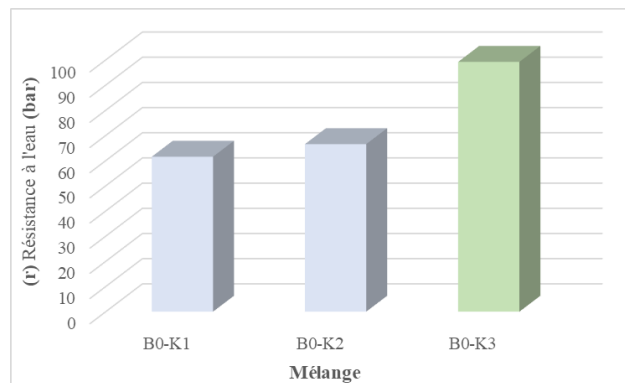


Figure III. 8 : Résistance de l'essai du Duriez après immersion dans l'eau.

On constate que ce béton présente une augmentation de la résistance à la compression après immersion de l'ordre de 38 % et 33 % par rapport aux mélanges B0-K1 et B0-K2 respectivement. Cette amélioration peut s'expliquer par le pourcentage de bitume contenu dans le mélange, qui contribue à former une couche protectrice résistante à l'eau, renforçant ainsi la cohésion et la résistance mécanique du matériau.

III.4.2. Résistance à l'immersion à l'air

D'après les résultats obtenus, le béton B0-K3 présente une augmentation significative de la résistance à la compression à l'air libre par rapport aux autres formulations.

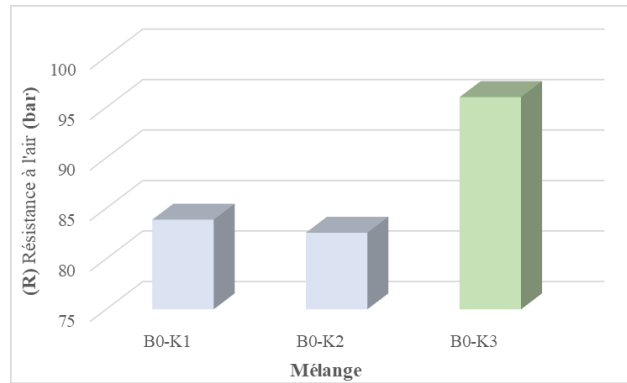


Figure III. 9 : Résistance des mélanges mesurée par l'essai de Duriez à l'air libre.

En effet, cette résistance est supérieure de 13 % et 14 % à celles des bétons B0-K1 et B0-K2, respectivement. Cette amélioration peut être attribuée à la composition optimisée du mélange B0-K3, qui favorise une meilleure cohésion interne et une meilleure distribution du liant, contribuant ainsi à renforcer la structure globale du béton.

III.4.3. Rapport d'immersion (r/R)

La valeur du rapport entre la résistance à la compression du béton bitumineux dans l'eau et celle dans l'air constitue un indicateur clé de l'efficacité et de la durabilité du matériau. Un rapport élevé traduit une bonne capacité du béton à conserver ses propriétés mécaniques, même en présence d'humidité. Cela signifie que le béton est capable de résister efficacement aux pressions exercées dans des environnements variés, assurant ainsi une meilleure performance et une longévité accrue des structures routières.

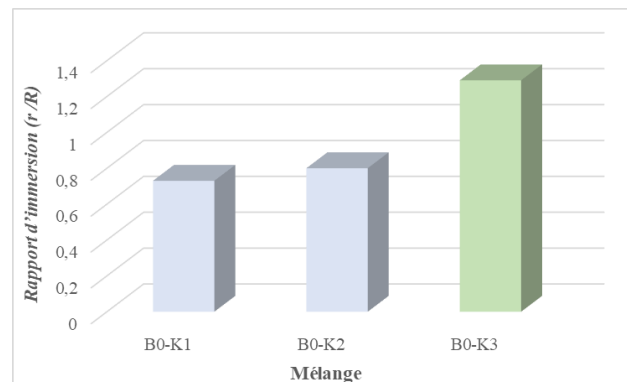


Figure III. 10: Rapport d'immersion.

D'après les résultats présentés dans la figure III.10, le béton B0-K3 affiche une valeur de rapport de résistance de compression égale à 1,29. Ces valeurs représentent une augmentation de 43 % et 38 % respectivement par rapport aux bétons B0-K1 et B0-K2.

Chapitre III : Résultats et Interprétation

Les différentes caractéristiques des essais Duriez réalisés sur les mélanges testés sont synthétisées dans le tableau ci-dessous : (Annexe)

III.5. Choix et modification les formulations du béton bitumineux 0/14

D'après les résultats des essais Marshall et Duriez effectués sur le béton bitumineux témoin, le mélange B0-K3 a été retenu comme référence en raison de ses performances globalement supérieures. Ainsi, ce mélange sera désormais désigné par l'appellation B0 dans la suite de l'étude.

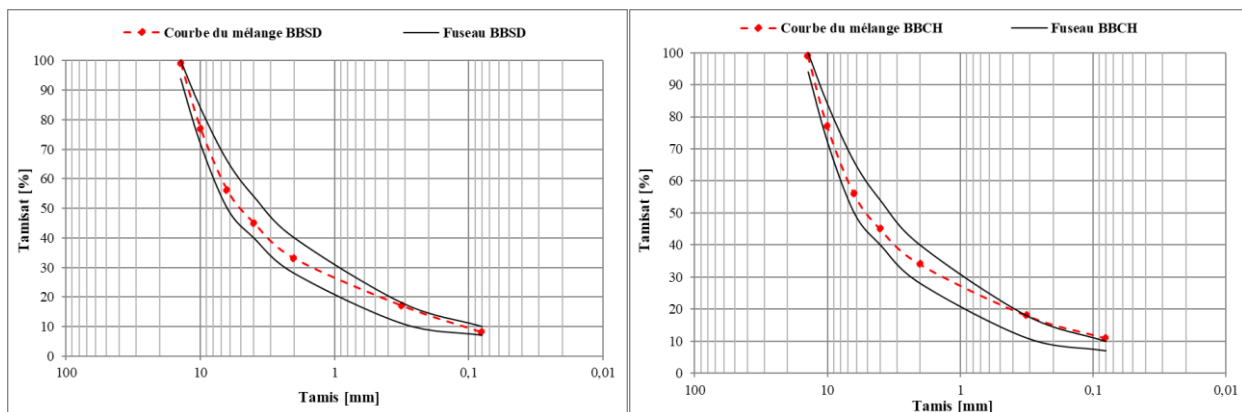
Avant de procéder au renforcement du mélange B0 avec des fibres plastiques, des proportions étudiées de sable de dunes et de chaux ont été ajoutées. Cette modification vise à améliorer les propriétés du mélange initial, notamment en termes de densité, de stabilité et de résistance au fluage.

La procédure de modification du mélange s'est appuyée sur l'ajustement de la courbe granulométrique globale, en suivant des étapes méthodiques visant à assurer une répartition optimale des constituants. Dans le cadre de cette étude, un mélange bitumineux de classe 0/14 a été formulé en remplaçant partiellement le sable concassé 0/3 par du sable de dunes et de la chaux.

Tableau III. 5: Pourcentages des compositions granulaires du mélange modifié.

Fractions	Éléments ajoutés		Sable 0/3	Gravier 3/8	Gravier 8/15	Total
Pourcentage des constituants (%)	Sable de dunes	02	41	22	35	100
	Chaux	02	41	22	35	100

La figure suivante présente la courbe granulométrique du mélange modifié par sable de dunes (SD) et chaud (CH), obtenue à partir des proportions calculées pour chaque fraction granulaire.



Chapitre III : Résultats et Interprétation

Figure III. 11 : Courbe granulométrique du mélange modifié par sable de dunes (SD) et chaud (CH).

Les nouvelles caractéristiques du béton bitumineux modifié par l'ajout de sable de dunes (SD) et de chaux (CH) sont présentées dans le tableau ci-dessous :

Tableau III. 6: Nouvelles caractéristiques du béton bitumineux modifié.

BB modifié	B0-CH	B0-SD	B0
Valeur de K	3.65		
Coefficient correcteur α	1.008	1.006	1.007
Surface spécifique Σ (m ² /kg)	16.74	14.71	14.96
Dosage en liant (%)	6.44	6.24	6.33

Des essais Marshall ont été réalisés après l'ajout de différentes proportions de sable de dunes et de chaux, dans le but de comparer leurs effets avec ceux des essais initiaux effectués sans ces ajouts. Les résultats ont mis en évidence l'impact significatif de ces modifications sur les propriétés mécaniques du béton bitumineux.

III.5.1. Stabilité Marshall

La figure III.12 illustre la stabilité des bétons bitumineux modifiés en fonction du module de richesse pour les formulations B0-SD, B0-CH et B0. Les résultats obtenus satisfont les exigences des normes en vigueur pour les travaux routiers, avec des valeurs de stabilité supérieures à 10,5 kN.

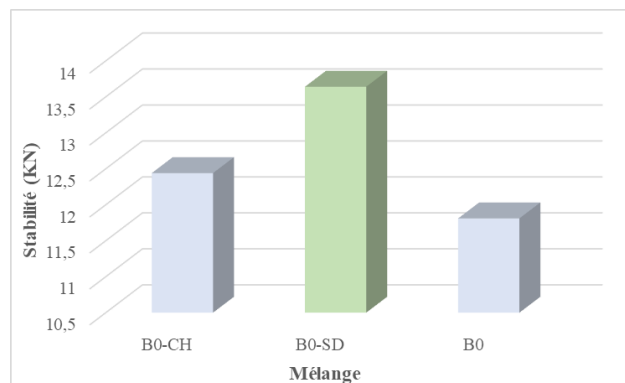


Figure III. 12 : Stabilité du mélange modifié mesurée par l'essai Marshall.

On observe que le béton B0-SD présente la meilleure stabilité parmi les différentes formulations, avec des gains respectifs de 09 % et 13 % par rapport aux bétons B0-CH et B0.

III.5.2. Fluage Marshall

La figure III.13 présente les résultats de fluage pour les différents bétons réalisés : B0-SD, B0-CH et B0. Parmi ces formulations, le mélange B0-SD affiche les meilleures performances, avec une valeur minimale de fluage de 2,66 mm.

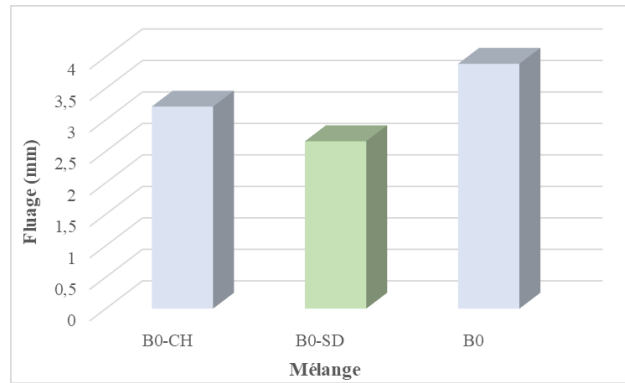


Figure III. 13 : Fluage du mélange modifié mesurée par l'essai Marshall.

On observe une réduction du fluage pour B0-SD par rapport aux bétons B0-CH et B0, avec des diminutions respectives de 17 % et 32 %. Il est également important de souligner que l'ensemble des résultats reste conforme aux exigences des spécifications pour les enrobés, qui imposent une valeur maximale de fluage inférieure à 4 mm.

III.5.3. La charge Marshall

D'après les résultats présentés dans la figure III.14, le mélange B0-SD affiche la meilleure performance en termes de charge maximale, avec une valeur estimée à 14,36 kN.

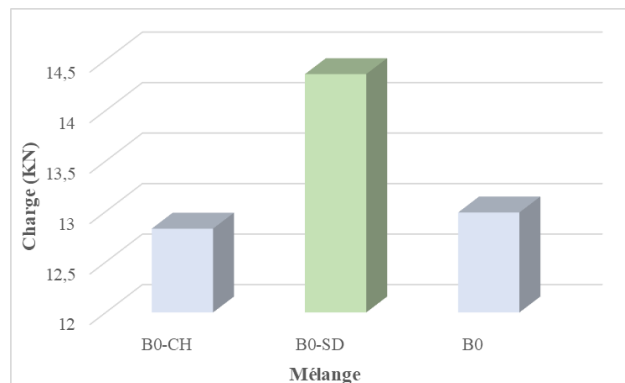


Figure III. 14 : Charge du mélange modifié mesurée par l'essai Marshall.

D'un autre côté, on peut également remarquer que le béton B0-SD présente une augmentation notable de la charge maximale par rapport aux formulations B0-CH et B0, avec des hausses respectives de 11 % et 09 %.

III.5.4. Densité théorique et apparente

Dans les trois cas, la densité apparente est inférieure à la densité théorique, ce qui traduit la présence d'une certaine porosité dans le matériau.

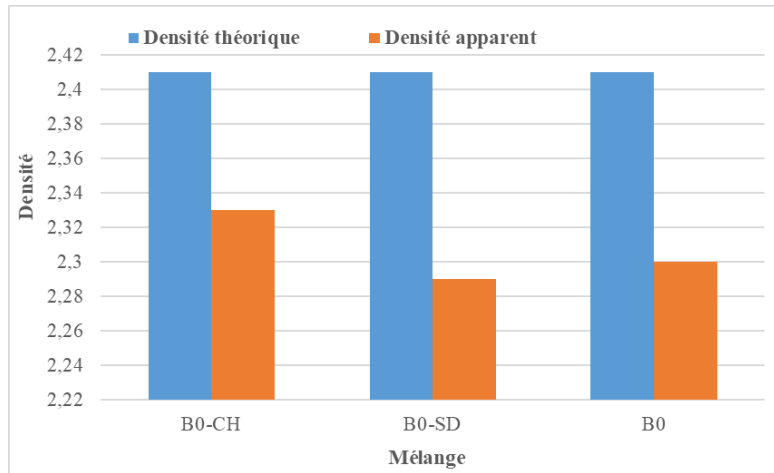


Figure III. 15: Densité théorique et apparente par mélange modifié.

L'analyse des densités révèle que le matériau étudié est globalement bien compacté, bien que de faibles porosités persistent. Les taux de compacité élevés (supérieurs à 95 %) indiquent une bonne qualité du procédé de fabrication ou de préparation des échantillons.

III.5.5. La compacité Marshall

Selon la figure III.16, les résultats indiquent que la compacité des trois formulations se situe dans l'intervalle recommandé par la norme.

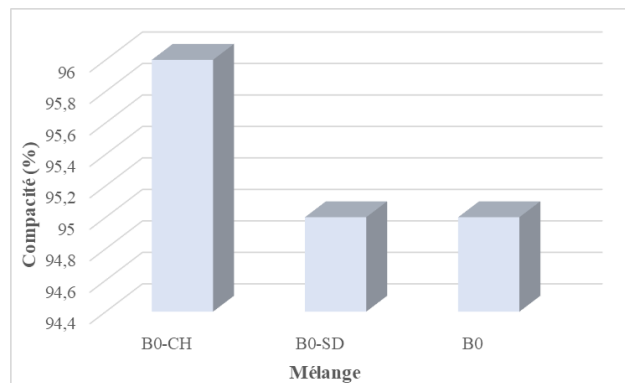


Figure III. 16: Compacité du mélange modifié mesurée par l'essai Marshall.

III.6. Formulation du béton bitumineux renforcé par déchets plastique

Dans le cadre de notre étude, les trois formulations initiales (B0, B0-CH et B0-SD) seront renforcées par l'ajout de fibres issues de déchets plastiques, d'une longueur de 3 cm (notées F). Ces fibres seront ajoutées selon : 0,50 %, 0,75 % et 1 %, afin d'évaluer leur influence sur les performances mécaniques du béton bitumineux.

Chapitre III : Résultats et Interprétation

La procédure de modification repose sur l'ajustement de la courbe granulométrique, en ciblant particulièrement la fraction 3/8, qui représente environ 22 % de la composition totale de l'enrobé. Les étapes de cette modification sont les suivantes :

- ✚ Nous avons remplacé les agrégats de la classe 3/8 par de fibre F avec les pourcentages 0,50%, 0,75% et 1% ;
- ✚ Produire le béton bitumineux ;
- ✚ Confection des éprouvettes Marshall (Photo III.5) ;
- ✚ Exécution des essais de l'étude



Photo III. 5 : Formulation du béton bitumineux par déchets plastique.

III.6.1. Evaluation des enrobés renforcés

III.6.1.1. Stabilité Marshall

La figure III.17 illustre la stabilité des bétons bitumineux pour les trois formulations (B0, B0-CH et B0-SD) renforcées par l'ajout de fibres issues de déchets plastiques. Les résultats obtenus satisfont les exigences des normes en vigueur pour les travaux routiers, avec des valeurs de stabilité supérieures à 10,5 kN.

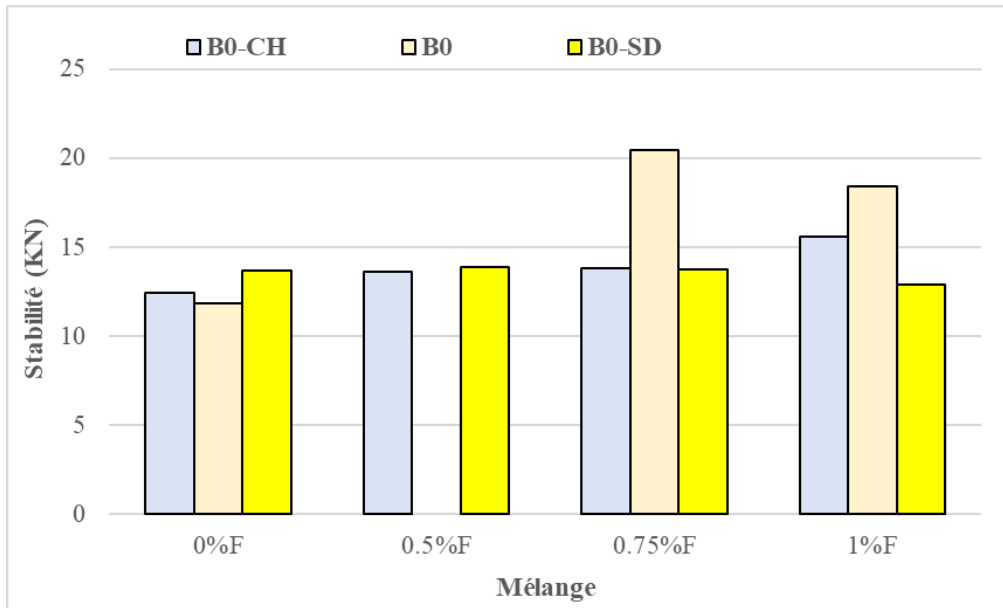


Figure III. 17 : Stabilité du béton bitumineux renforcé par déchet plastique.

On observe que le béton B0 présente la meilleure stabilité parmi les différentes formulations, par rapport aux bétons B0-CH et B0-SD. Une augmentation de la stabilité a été observée pour les mélanges B0-CH-0,75%F et B0-CH-1%F, respectivement de l'ordre de 42% et 36% par rapport au béton de B0-CH. De plus, nous notons que la diminution pour les mélanges B0-SD-0,75%F et B0-SD-1%F, respectivement, est de 01% et 06% par rapport au béton de B0-SD-0,5%F, et aussi une augmentation pour les mélanges B0-0,75%F et B0-1%F, respectivement, est de 10% et 13% par rapport au béton de B0.

III.6.1.2. Fluage Marshall

La figure III.18 présente les résultats de fluage pour les différents bétons réalisés : B0-SD, B0-CH et B0 et renforcé par déchet plastique.

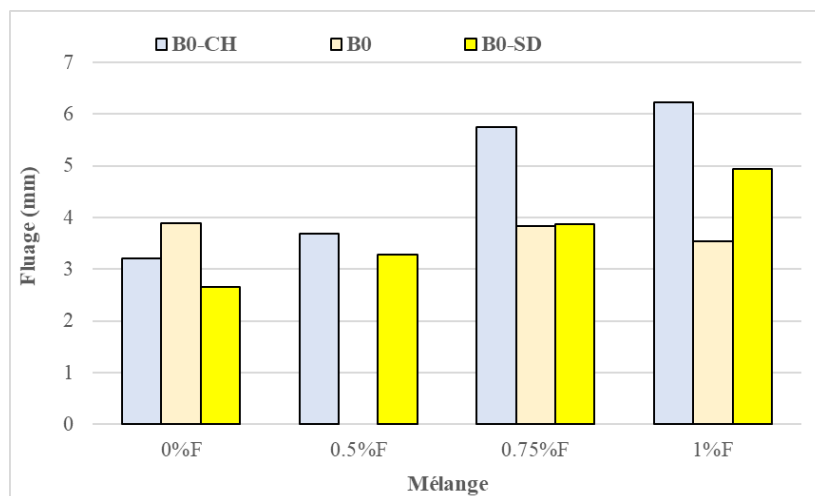


Figure III. 18: Fluage du béton bitumineux renforcé par déchet plastique.

Chapitre III : Résultats et Interprétation

Parmi ces formulations, le mélange B0 affiche les meilleures performances, avec une valeur minimale de fluage de 3 mm pour les deux fractions (0.75% et 1%). On observe une augmentation du fluage des mélanges B0-CH-0,50%F, B0-CH-0,75%F et B0-CH-1%F est respectivement de l'ordre de 28%, 52% et 57% par rapport aux bétons B0-CH, et la même pour les mélanges B0-SD-0,50%F, B0-SD-0,75%F et B0-SD-1%F est respectivement de l'ordre de 19%, 31% et 46% par rapport aux bétons B0-SD. Par contre une diminution du fluage des mélanges B0-0,75%F et B0-1%F est respectivement de l'ordre de 2% et 9% par rapport aux bétons B0.

III.6.1.3. Densité théorique et apparente

Dans les trois cas, la densité apparente est inférieure à la densité théorique, ce qui traduit la présence d'une certaine porosité dans le matériau.

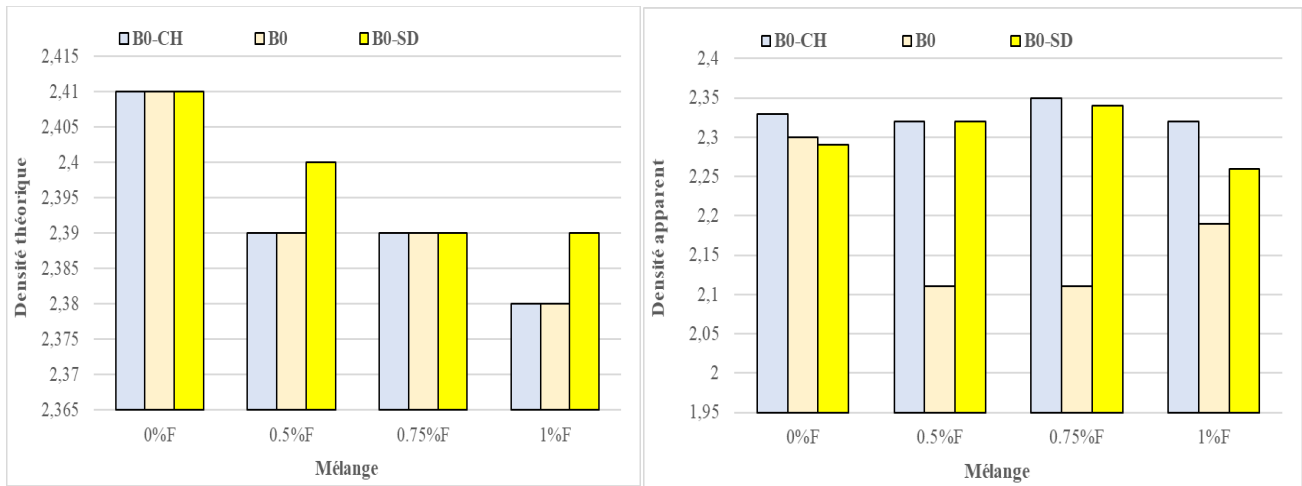


Figure III. 19 : Densité théorique et apparente du béton bitumineux renforcé par déchet plastique.

La présence des fibres peut entraîner une augmentation locale de porosité, notamment si elles ne sont pas bien réparties. Les taux de compacité élevés (supérieurs à 88 %) indiquent une bonne qualité du procédé de fabrication ou de préparation des échantillons.

III.6.1.4. La compacité Marshall

Selon la figure III.20, les résultats indiquent que la compacité des trois formulations se situe dans l'intervalle recommandé par la norme pour la majorité.

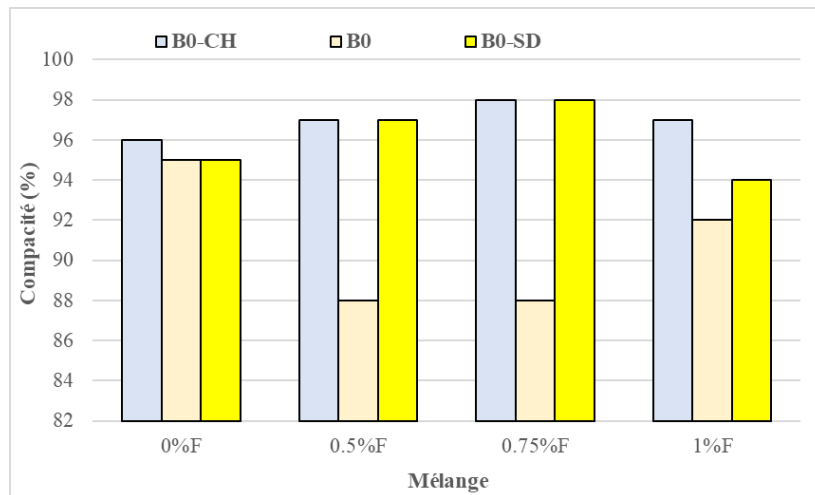


Figure III. 20: Compacité du béton bitumineux renforcé par déchet plastique.

La figure III .20 montre une augmentation de la compacité pour B0-SD et B0-CH (sauf 1%F). Cette augmentation de la compacité des mélanges B0-SD-0,50%F et B0-SD-0,75%F est respectivement de l'ordre de 2% et 3% par rapport aux bétons B0-SD. Nous notons aussi que l'augmentation de la compacité des mélanges B0-CH-0,50%F et B0-CH-0,75%F, respectivement, est de 1% et 2% par rapport au béton B0-CH. Par contre une diminution du fluage des mélanges B0-0,5%F, B0-0,75%F et B0-1%F est respectivement de l'ordre de 3%, 2% et 9% par rapport aux bétons B0.

III.7. Résultats d'essai de détermination du module de rigidité

L'essai de détermination du module de rigidité est réalisé sur des éprouvettes circulaires ayant un diamètre compris entre 80 et 200 mm, et une épaisseur variant de 30 à 75 mm. Dans notre cas, l'essai a été effectué sur des éprouvettes Marshall, ayant une épaisseur de 63,5 mm (valeur visée) et un diamètre optimal de 101,6 mm. Le malaxage des matériaux a été réalisé au laboratoire LTPS de Ouargla, tandis que la confection des éprouvettes ainsi que les essais ont été effectués au laboratoire LTPS de Ghardaïa. Après démoulage, les éprouvettes ont été conservées pendant un minimum de 4 heures à une température constante de 15 °C, afin de garantir une homogénéité thermique avant l'essai. Cette étape est essentielle pour assurer une réponse élastique fiable du matériau, permettant ainsi une détermination précise du module de rigidité. L'éprouvette est ensuite fixée sur un châssis de montage, sur lequel est placé un plateau de répartition de charge.

L'ensemble du dispositif est maintenu à l'aide d'un châssis d'alignement. Le piston est positionné au centre du plateau. Par la suite, les données géométriques de l'éprouvette (épaisseur et diamètre) sont saisies dans le logiciel de pilotage, en plus des conditions aux

Chapitre III : Résultats et Interprétation

limites, qui restent constantes (coefficient de Poisson de 0,35 et microdéformation visée de 5 microns). L'essai consiste en une série de cycles de chargement, avec un nombre de répétitions variant entre 5 et 10. Dans notre cas, l'essai a été réalisé avec 5 cycles de chargement, espacés d'un temps de 124 secondes entre chaque application de charge.



Photo III. 6: (Nat Apparatus Test).

Le module de rigidité exprime la relation entre la contrainte appliquée et la déformation résultante dans le domaine élastique du matériau. Il reflète la capacité de l'éprouvette à résister à la déformation sous l'effet d'une charge, permettant ainsi d'évaluer la rigidité intrinsèque du matériau testé. La valeur de ce module dépend à la fois des dimensions géométriques de l'éprouvette (diamètre et épaisseur) et des réponses mécaniques observées lors de l'essai. Dans le cadre de cette étude, les mesures de contraintes et de déformations enregistrées au cours de cinq cycles de chargement ont été utilisées pour calculer avec précision le module de rigidité. Les résultats obtenus sont présentés dans la figure III.21.

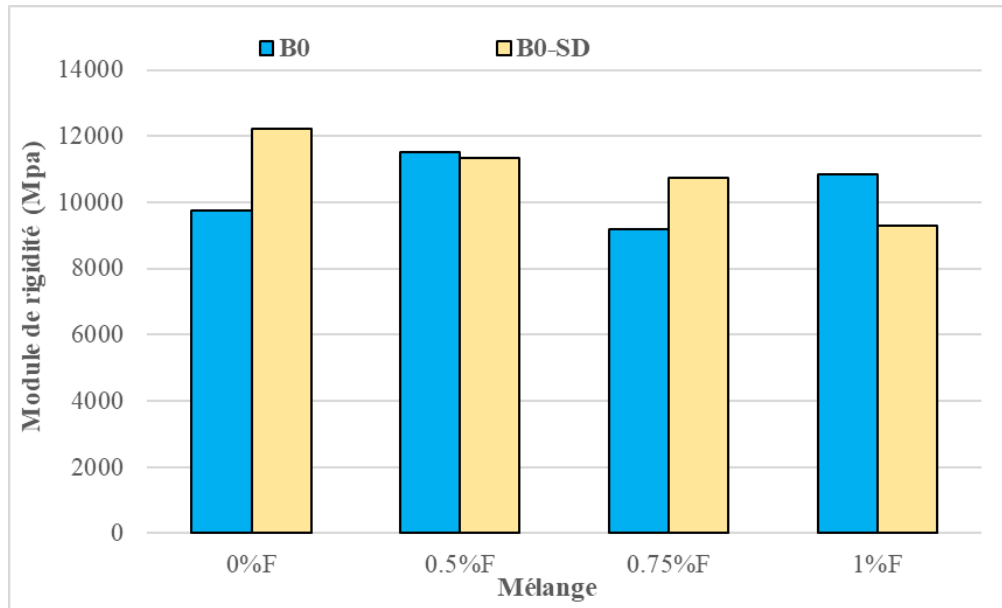


Figure III. 21: Évaluation du module de rigidité pour le béton fibré.

La figure III.21 met en évidence une tendance générale à la baisse du module de rigidité pour le mélange B0, à mesure que la fraction de fibres augmente. Malgré cette diminution, toutes les valeurs mesurées restent supérieures au seuil minimal requis par les critères de performance, fixé à 7000 MPa. Les pertes de rigidité observées pour le béton B0-SD par rapport au béton de référence B0 sont les suivantes :

- 0,50% de fibres: diminution de 07 % ;
- 0,75% de fibres: diminution de 12 % ;
- 1% de fibres: diminution de 24 %.

En revanche, les bétons renforcés avec des fibres de type B0 présentent des résultats plus contrastés:

- 0,50% de fibres: augmentation de 15 % ;
- 0,75% de fibres: diminution de 20 % ;
- 1% de fibres: augmentation de 15 %.

Ces résultats suggèrent que l'incorporation de fibres a un impact plus modéré, voire bénéfique, sur la rigidité du béton bitumineux B0, en particulier pour les fractions de 0,50 % et 1 %, qui montrent une amélioration du module de rigidité. Cela indique une meilleure compatibilité de ces fibres avec le mélange B0, ainsi qu'une meilleure préservation des propriétés mécaniques du matériau.

III.8. Conclusion

Les essais réalisés ont permis d'évaluer l'effet des fibres plastiques recyclées sur les performances mécaniques du béton bitumineux, en comparaison avec des formulations modifiées par du sable de dunes (SD) et de la chaux (CH). Les résultats ont montré que la formulation B0-K3 offre les meilleures propriétés initiales (stabilité, compacité, résistance à l'eau). L'ajout de sable de dunes et de chaux a permis d'améliorer certaines performances, notamment la stabilité et la charge maximale, avec une efficacité marquée pour le mélange B0-SD.

L'introduction de fibres plastiques a eu un impact variable selon la formulation : une légère baisse du module de rigidité pour B0-SD, mais un effet bénéfique pour B0, avec une amélioration de certaines propriétés mécaniques pour des taux de fibres de 0,5 % et 1 %. Les valeurs restent globalement conformes aux normes techniques. Ces résultats confirment l'intérêt de valoriser les déchets plastiques dans les enrobés, à condition d'adapter la formulation pour garantir une compatibilité optimale et maintenir les performances du matériau.

Conclusion

Générale

Conclusion générale

L'étude menée sur l'ajout de fibres issues de déchets plastiques dans le béton bitumineux a permis d'évaluer leur influence sur les performances mécaniques du matériau, notamment en termes de rigidité, stabilité, et comportement sous charge répétée.

L'ensemble des essais réalisés dans ce travail a permis d'évaluer de manière rigoureuse l'impact de l'ajout de fibres plastiques issues de déchets, ainsi que l'effet de l'incorporation de sable de dunes et de chaux, sur les propriétés mécaniques du béton bitumineux.

L'analyse des résultats obtenus à travers les essais Marshall et Duriez a d'abord conduit à identifier la formulation B0-K3 comme étant la plus performante parmi les mélanges de référence. Cette formulation a démontré une excellente stabilité, une résistance mécanique accrue, une compacité satisfaisante et une bonne tenue face à l'humidité, avec un rapport d'immersion (r/R) largement supérieur au seuil requis.

La modification de la formulation par l'ajout de sable de dunes (SD) et de chaux (CH) a ensuite permis d'optimiser davantage les performances mécaniques, notamment en termes de stabilité, de résistance au fluage et de charge maximale. Le mélange B0-SD, en particulier, s'est distingué par sa stabilité élevée et son comportement favorable à la compression, ce qui en fait une base intéressante pour l'incorporation de fibres.

L'ajoute de fibres plastiques selon différentes fractions massiques (0,50 %, 0,75 % et 1 %) a produit des effets variables sur les caractéristiques mécaniques. Pour le béton modifié avec SD, une diminution progressive du module de rigidité a été constatée avec l'augmentation de la teneur en fibres, bien que les valeurs restent supérieures au seuil minimal de 7000 MPa. À l'inverse, le béton B0 a présenté des réponses plus positives : certaines fractions de fibres (notamment 0,50 % et 1 %) ont conduit à une amélioration de la rigidité, traduisant une meilleure compatibilité des fibres avec cette formulation..

De manière globale, l'intégration de fibres issues de déchets plastiques dans le béton bitumineux se révèle prometteuse sous certaines conditions de formulation. Toutefois, leur efficacité dépend fortement du type de matrice bitumineuse utilisée et du dosage appliqué. Ces résultats mettent en évidence la nécessité d'un calibrage précis des formulations afin de

tirer pleinement profit de l'apport des fibres sans compromettre les propriétés essentielles du matériau.

En conclusion, bien que les fibres plastiques issues de déchets puissent représenter une solution durable et économique pour valoriser des matériaux recyclés dans les enrobés bitumineux, leur utilisation nécessite une optimisation rigoureuse des formulations. Des recherches complémentaires sont recommandées pour améliorer la compatibilité entre les fibres et le liant, affiner les procédés de malaxage, et garantir des performances mécaniques et environnementales satisfaisantes à long terme.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] AMIRA Charafeddin (2015). « Béton bitumineux renforcé par fibre métallique : étude des procédures de valorisation par les fibres métalliques ». Mémoire Master Génie civil. Université Kasdi Merbah Ouargla.
- [2] <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/construction-et-travaux-publics-th3/les-routes-les-ponts-et-les-joints-42235210/liants-hydrocarbures-c904/definition-c904niv10001.html>
- [3] Baba Mohammed Elamin (2021). « Etude de formulation d'un béton bitumineux semi-grenu BBSG 0/14 pour couche de roulement : Cas de granulats ». Mémoire Master. Université de Adrar.
- [4] BAZZINE Rabia (2013). « Influence de l'ajout de la poudrette de caoutchouc sur la stabilité des enrobés bitumineux ». Mémoire Magister. Université de Ouargla.
- [5] BENLEFKIH Rania, KHELIF Khaoula (2024). « Effet de l'ajout des fibres de déchets plastiques sur les performances mécaniques du béton bitumineux ». Mémoire Master Génie civil. Université Kasdi Merbah Ouargla.
- [6] BEN DHIA Mohamed Habib (1998) : Quelques particularités de l'utilisation du sable de dune en construction routière en milieu saharien, bulletin des laboratoires des ponts et chaussées.
- [7] <https://www.inrs.fr/risques/bitume/de-quoi-parle-t-on.html>
- [8] FNOR (2002), EN 12597: Bitumes et liants bitumineux - Terminologie, AFNOR.
- [9] DAAS, D. and HACHANI, M.I. (2013). « Etude expérimentale d'un béton bitumineux modifié à la poudrette de caoutchouc ». Mémoire Master. Université de Ouargla.
- [10] [The Influence of Coffee Husk Ash as a Filler on the Performance of Bituminous Concrete Mix - Tessema - 2022 - Advances in Materials Science and Engineering - Wiley Online Library](#)
- [11] <https://www.lindqvist-international.com/produit/machine-los-angeles/>
- [12] https://issuu.com/idropproject/docs/essai_micro_deval
- [13] DINE Hafsa (2014) « Formulation par la méthode Marshall d'un béton bitumineux à module amélioré par ajout de PR PLAST SAHARA ». Ecole Nationale Polytechnique. Alger.

Références bibliographiques

[14] [béton bitumineux - GuideBeton.com](#)

[15] <https://www.proviteq.com/produits-genie-civil/route/route-module-de-rigidite/>

[16] HADJI Oussama, GABOUSSA Oussama (2024). « Étude expérimentale de l'ajout de déchets de la poudre du café sur les caractéristiques d'un béton bitumineux avec sable de dune » Mémoire Master. Université de Ouargla.

[17] IBEK Yahia ET LITIEM Lamine (2019). « Etude des caractéristiques d'un bitume pur modifié par PVC ». Mémoire Master. Université de Ouargla.

[18] KEMASSI Nassima (2019). « Bitume Hautement Modifiés par Polymère (HiMA): Influence des polymères sur la viscosité des liants –Etude de cas : D0234 ». Mémoire Master. Université de Ouargla.

[19] AFNOR (1999), NF EN 1426 : Bitumes et liants bitumineux - Détermination de la pénétrabilité à l'aiguille.

[20] SIDIBE Aissata, HAMADI Houssam (2020). « Amélioration du béton bitumineux par des polymères issus du recyclage ». Mémoire Master. Université de Guelma.

[21] ZEMMIRI Anouar Abdelaziz « Comparaison des formulations d'enrobes à chaud pour couches de roulement des chaussées très circulées utilisées en France et en Algérie du point de vue sécurité (glissance) et orniérage » Certificat d'études supérieures - ENTPE de Lyon 2008.

Liste les normes

- NF P 18-554** :<< Essai analyse granulométrique par tamisage >>
NF EN 933_3 :<<Essai coefficient d'aplatissement de granulat>>
NF 15-461 :<<Analyse chimique>>
NF P 18-591 :<<Essai de propriété superficiel >>
NF EN 1097_2 :<< Essai los Angeles>>
NF EN 1097_1 :<< Essai micro deval>>
NF EN 933- 8 :<<Essai équivalent des sables>>
NF EN 933_9 :<<Essai au bleu de méthylène>>
NF P18-301 :<<La masse volumique absolue>>
NF P18-301 :<<La masse volumique apparent>>
NF EN 1426 :<<Pénétrabilité>>
NF EN 1427:<<Point de ramollissement>>
NF EN 15326+A1 :<<Densité relative à 25C>>
NF EN 13108-1 : 2007 << Module de rigidité>>

Annexes

III-12 – SPECIFICATIONS DES BITUMES PURS.

Caractéristiques	Méthode normalisée de référence	Classes				
		20/30	40/50	60/70	80/100	180/220
Pénétrabilité à 25°C , 100grs, 5 sec, (1/10mm)	NF T 66-004	20 à 30	40 à 50	60 à 70	80 à 100	180 à 220
TBA (°C), température du point de ramollissement bille et anneau	NF T 66-008	52 à 65	47 à 60	43 à 56	41 à 51	34 à 43
Densité relative à 25°C	NF T 66-007	1,00 à 1,10	1,00 à 1,10	1,00 à 1,10	1,00 à 1,07	1,00 à 1,07
Ductilité à 25°C, 50 mm/mn (cm)	NF T 66-006	> 25	> 60	> 80	> 100	> 100
Solubilité dans le Tetra-chloroéthylène C ₂ Cl ₄ (%)	NF T 66-012	> 99.5 %	> 99.5 %	> 99.5 %	> 99.5 %	> 99.5 %
Teneur en paraffine (%)	Méthode LCPC	< 4,5 %	< 4,5 %	< 4,5 %	< 4,5 %	< 4,5 %
Perte de masse au chauffage (%)	NF T 66-011	< 1	< 1	< 1	< 2	< 2
Pénétrabilité restante par rapport à la température initiale après perte de masse au chauffage (%)	> 70	> 70	> 70	> 70	> 70	> 70
Point d'éclair (Appareil Cleveland) à vase ouvert. (°C)	> 250	> 250	> 230	> 230	> 230	> 230
Température limite de pompabilité (°C)	-	140	125	120	115	105

LABORATOIRE DES TRAVAUX PUBLICS DU SUD

--

Structure :.....

Lieu de

travail :.....

N° Dossier interne :.....

Date :.....

Classe granulaire .. 0/3.....

Opérateur :.....

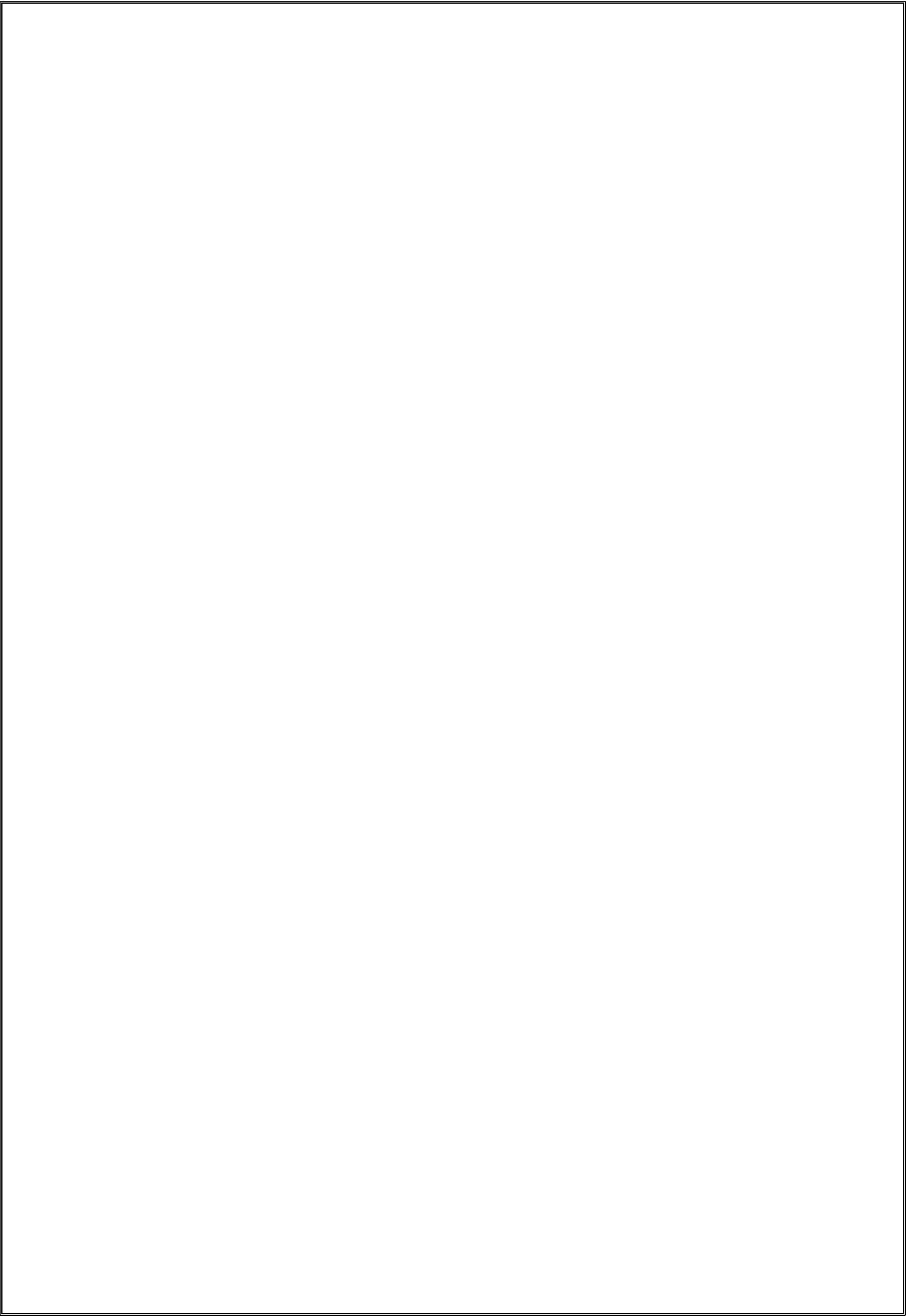
Prise d'essai :.....1200 g.....

Équipements utilisés.....

N°D

inventaire :.....

Tamis	Refus partiel	Refus cumulé	Pourcentage refus	Pourcentage passant	Observations
80					
63					
50					
40					
31.5					
25					
20					
16					
12.5					
10					
8					
6.3					
5					
4					
3.15					
2.5					
2					
1.60					
1.25					
1					
0.80					
0.63		0	0	100	
0.500					
0.400					
0.315		54	9	91	
0.250					
0.200					
0.160		240	41	59	
0.125					
0.100					
0.080		588	98	2	



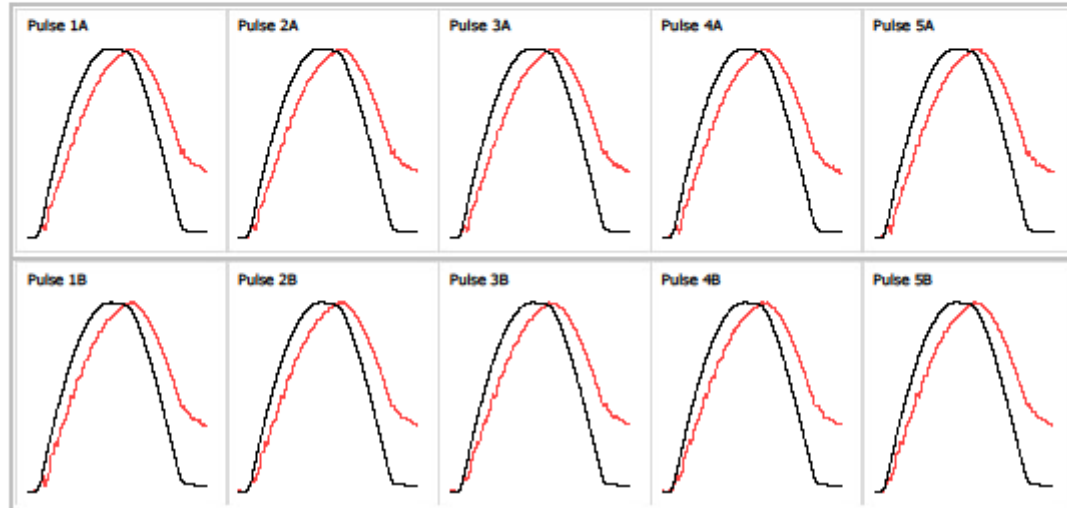
Stiffness Modulus: EN 12697-26: Annex C, April 2005

Date of Test: 21 May 2025 @ 09:15
Report Number:
Operator: AHMED BEN SEDDIK
Specimen ID: EP01
Client Name:

Lab Address: LTP Sud

Test Temperature (°)	15
Bulk Density (kg/m ³)	2300
Diameter (mm)	101
Thickness (mm)	61

Conditioning Pulses	10
Poissons Ratio	0.35
A & B Target Rise Time (ms)	124
A & B Target Deformation (µm)	5

**Test Results**

	1A	2A	3A	4A	5A	Mean A	1B	2B	3B	4B	5B	Mean B	Mean A&B
Load Peak to Peak (kN)	4.566	4.567	4.567	4.566	4.566	4.566	4.316	4.315	4.317	4.317	4.315	4.316	4.441
Horizontal Stress (kPa)	471.8	471.9	471.9	471.8	471.8	471.8	445.9	445.9	446.0	446.1	445.9	446.0	458.9
Load-Area Factor	0.66	0.66	0.66	0.66	0.66	0.66	0.66	0.66	0.66	0.66	0.66	0.66	0.66
Horizontal Deformation (µm)	5.06	5.06	5.06	5.06	5.06	5.06	4.70	4.70	4.70	4.70	4.70	4.70	4.88
Load Rise Time (ms)	124	124	124	124	124	124	124	124	124	124	124	124	124
Measured Stiffness (MPa)	9328	9361	9389	9381	9381	9368	9505	9443	9407	9462	9427	9449	9408
Adjusted Stiffness Modulus (MPa)	9686	9718	9747	9739	9740	9726	9876	9810	9772	9829	9793	9816	9771

Data File: EP01_1.tdms

Notes: Record details about the specimen in this area:

Bulk Density:
Poisson's Ratio:
Description of asphaltic material:
How it was mixed:
How it was compacted:
How bulk density was determined:
How the specimen was stored:

Signed:

Date:

cooper
INSTRUMENTS**B0-0.5%F**

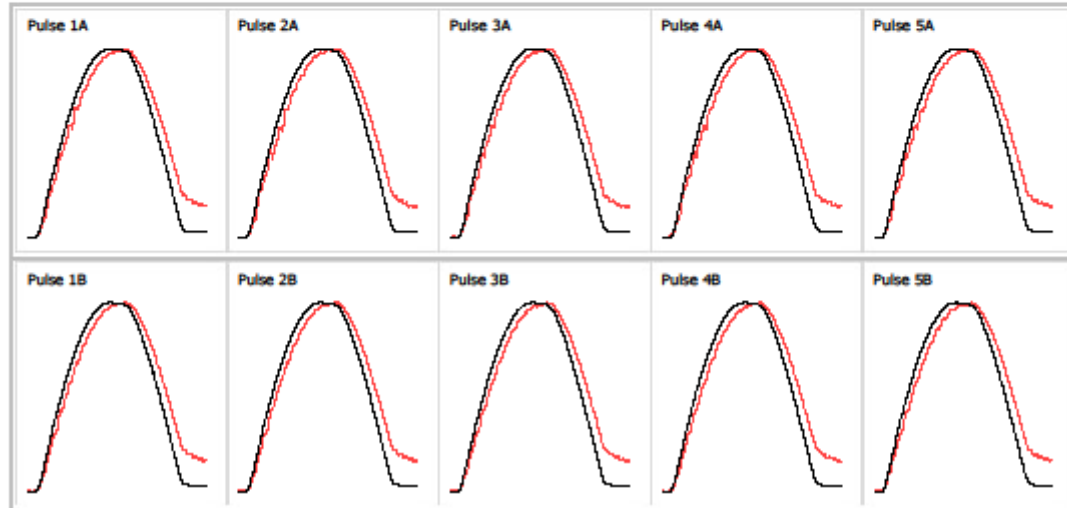
Stiffness Modulus: EN 12697-26: Annex C, April 2005

Date of Test: 21 May 2025 @ 10:17
Report Number:
Operator: AHMED BEN SEDDIK
Specimen ID: EP02
Client Name:

Lab Address: LTP Sud

Test Temperature (°)	15
Bulk Density (kg/m ³)	2155
Diameter (mm)	101
Thickness (mm)	59

Conditioning Pulses	10
Poissons Ratio	0.35
A & B Target Rise Time (ms)	124
A & B Target Deformation (µm)	5

**Test Results**

	1A	2A	3A	4A	5A	Mean A	1B	2B	3B	4B	5B	Mean B	Mean A&B
Load Peak to Peak (kN)	4.920	4.920	4.921	4.921	4.920	4.921	4.911	4.911	4.909	4.911	4.911	4.910	4.915
Horizontal Stress (kPa)	522.7	522.7	522.8	522.8	522.7	522.8	521.7	521.7	521.5	521.7	521.7	521.7	522.2
Load-Area Factor	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65
Horizontal Deformation (µm)	4.72	4.72	4.72	4.72	4.72	4.72	4.68	4.68	4.68	4.68	4.68	4.68	4.70
Load Rise Time (ms)	125	125	125	125	125	125	125	125	124	125	125	125	125
Measured Stiffness (MPa)	11070	11160	11190	11099	11117	11127	11150	11115	11095	11089	11072	11104	11116
Adjusted Stiffness Modulus (MPa)	11458	11553	11584	11487	11507	11518	11546	11509	11468	11482	11465	11494	11506

Data File: EP02_3.tdms

Notes: Record details about the specimen in this area:

Bulk Density:
Poisson's Ratio:
Description of asphaltic material:
How it was mixed:
How it was compacted:
How bulk density was determined:
How the specimen was stored:

Signed:

Date:

cooper
INSTRUMENTS

B0-0.75%F

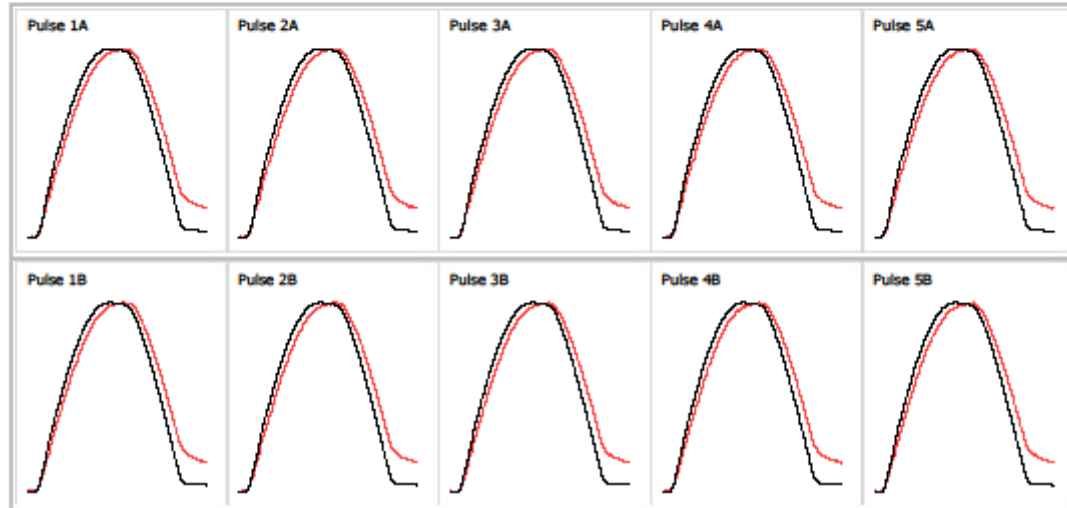
Stiffness Modulus: EN 12697-26: Annex C, April 2005

Date of Test: 21 May 2025 @ 10:36
Report Number:
Operator: AHMED BEN SEDDIK
Specimen ID: EP03
Client Name:

Lab Address: LTP Sud

Test Temperature (°)	15
Bulk Density (kg/m ³)	2145
Diameter (mm)	101
Thickness (mm)	60

Conditioning Pulses	10
Poissons Ratio	0.35
A & B Target Rise Time (ms)	124
A & B Target Deformation (µm)	5

**Test Results**

	1A	2A	3A	4A	5A	Mean A	1B	2B	3B	4B	5B	Mean B	Mean A&B
Load Peak to Peak (kN)	4.094	4.094	4.095	4.094	4.096	4.094	4.045	4.045	4.045	4.046	4.045	4.045	4.070
Horizontal Stress (kPa)	430.0	430.1	430.2	430.1	430.2	430.1	424.9	425.0	425.0	425.1	424.9	425.0	427.6
Load-Area Factor	0.66	0.66	0.65	0.66	0.65	0.65	0.66	0.65	0.66	0.66	0.66	0.66	0.66
Horizontal Deformation (µm)	4.87	4.87	4.87	4.87	4.87	4.87	4.79	4.79	4.79	4.79	4.79	4.79	4.83
Load Rise Time (ms)	124	124	124	124	124	124	125	124	125	125	125	125	124
Measured Stiffness (MPa)	8861	8834	8816	8850	8816	8835	8903	8867	8860	8876	8839	8869	8852
Adjusted Stiffness Modulus (MPa)	9196	9167	9147	9183	9145	9168	9254	9200	9210	9225	9188	9215	9192

Data File: EP03_2.tdms

Notes: Record details about the specimen in this area:

Bulk Density:
Poisson's Ratio:
Description of asphaltic material:
How it was mixed:
How it was compacted:
How bulk density was determined:
How the specimen was stored:

Signed:

Date:

cooper
INSTRUMENTS

B0-1%F

B0-SD

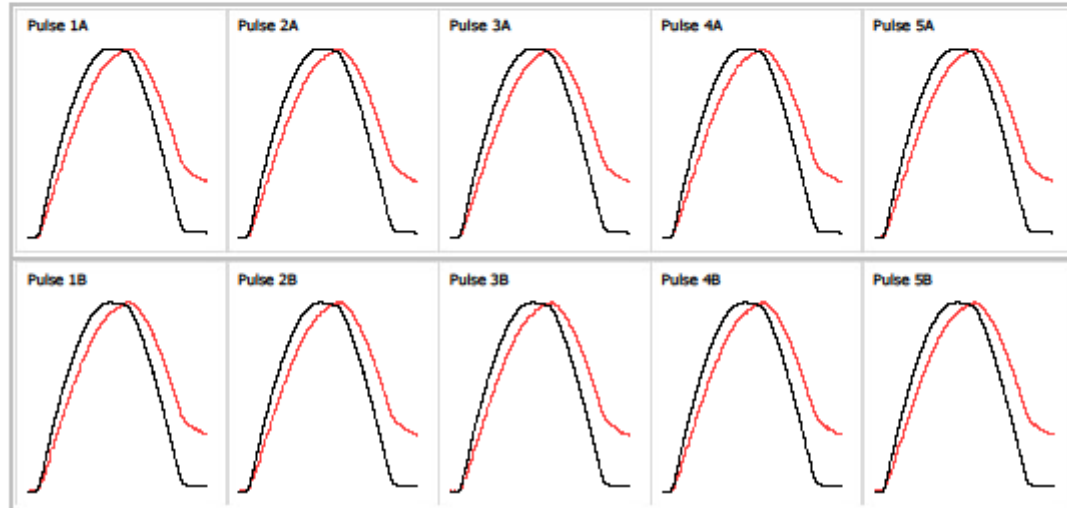
Stiffness Modulus: EN 12697-26: Annex C, April 2005

Date of Test: 21 May 2025 @ 11:19
 Report Number:
 Operator: AHMED BEN SEDDIK
 Specimen ID: EP05
 Client Name:

Lab Address: LTP Sud

Test Temperature (°C)	15
Bulk Density (kg/m ³)	2327
Diameter (mm)	101
Thickness (mm)	61

Conditioning Pulses	10
Poissons Ratio	0.35
A & B Target Rise Time (ms)	124
A & B Target Deformation (µm)	5



Test Results

	1A	2A	3A	4A	5A	Mean A	1B	2B	3B	4B	5B	Mean B	Mean A&B
Load Peak to Peak (kN)	5.328	5.327	5.328	5.329	5.329	5.328	5.253	5.254	5.253	5.253	5.254	5.253	5.291
Horizontal Stress (kPa)	553.5	553.5	553.5	553.6	553.6	553.5	545.7	545.8	545.8	545.7	545.8	545.8	549.7
Load-Area Factor	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65
Horizontal Deformation (µm)	4.68	4.68	4.68	4.68	4.68	4.68	4.62	4.62	4.62	4.62	4.62	4.62	4.65
Load Rise Time (ms)	123	123	123	123	123	123	124	124	124	124	124	124	123
Measured Stiffness (MPa)	11819	11789	11790	11791	11803	11798	11798	11813	11792	11801	11764	11794	11796
Adjusted Stiffness Modulus (MPa)	12237	12207	12206	12206	12219	12215	12208	12223	12203	12212	12173	12204	12210

Data File: EP05_1.tdms

Notes: Record details about the specimen in this area:

Bulk Density:
 Poisson's Ratio:
 Description of asphaltic material:
 How it was mixed:
 How it was compacted:
 How bulk density was determined:
 How the specimen was stored:

Signed:

Date:

cooper

BSD-0.5%F

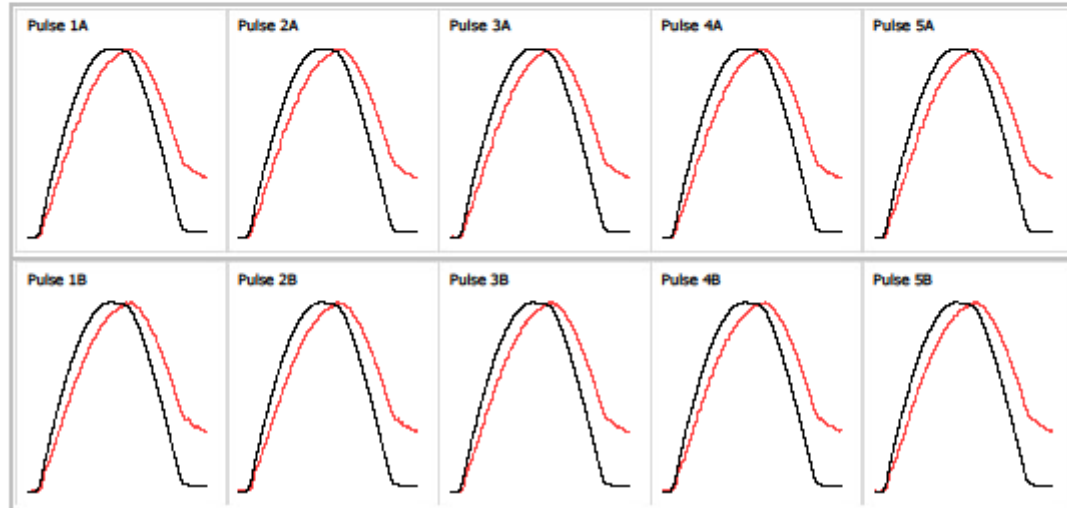
Stiffness Modulus: EN 12697-26: Annex C, April 2005

Date of Test: 21 May 2025 @ 12:14
 Report Number:
 Operator: AHMED BEN SEDDIK
 Specimen ID: EP06
 Client Name:

Lab Address: LTP Sud

Test Temperature (°)	15
Bulk Density (kg/m3)	2342
Diameter (mm)	101
Thickness (mm)	59

Conditioning Pulses	10
Poissons Ratio	0.35
A & B Target Rise Time (ms)	124
A & B Target Deformation (um)	5



Test Results

	1A	2A	3A	4A	5A	Mean A	1B	2B	3B	4B	5B	Mean B	Mean A&B
Load Peak to Peak (kN)	4.847	4.849	4.849	4.849	4.847	4.848	4.817	4.818	4.818	4.817	4.819	4.818	4.833
Horizontal Stress (kPa)	519.4	519.6	519.5	519.6	519.3	519.5	516.2	516.2	516.2	516.2	516.3	516.2	517.8
Load-Area Factor	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.66	0.65	0.65	0.65
Horizontal Deformation (um)	4.72	4.72	4.72	4.72	4.72	4.72	4.73	4.73	4.73	4.73	4.73	4.73	4.73
Load Rise Time (ms)	125	125	126	126	126	126	126	126	126	125	126	126	126
Measured Stiffness (MPa)	11000	10987	10986	10970	10948	10978	10926	10946	10965	10936	10930	10941	10959
Adjusted Stiffness Modulus (MPa)	11420	11406	11361	11346	11321	11371	11320	11339	11359	11374	11323	11343	11357

Data File: EP06_2.tdms

Notes: Record details about the specimen in this area:

Bulk Density:
 Poisson's Ratio:
 Description of asphaltic material:
 How it was mixed:
 How it was compacted:
 How bulk density was determined:
 How the specimen was stored:

Signed:

Date:

cooper

BSD-0.75%F

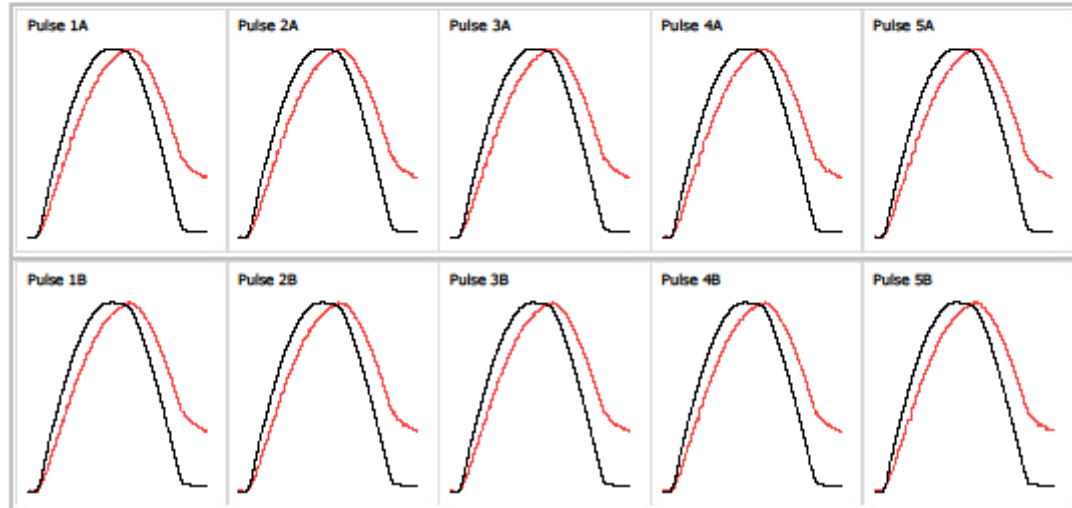
Stiffness Modulus: EN 12697-26: Annex C, April 2005

Date of Test: 21 May 2025 @ 12:34
 Report Number:
 Operator: AHMED BEN SEDDIK
 Specimen ID: EP07
 Client Name:

Lab Address: LTP Sud

Test Temperature (°)	15
Bulk Density (kg/m ³)	2366
Diameter (mm)	101
Thickness (mm)	58

Conditioning Pulses	10
Poissons Ratio	0.35
A & B Target Rise Time (ms)	124
A & B Target Deformation (µm)	5



Test Results

	1A	2A	3A	4A	5A	Mean A	1B	2B	3B	4B	5B	Mean B	Mean A&B
Load Peak to Peak (kN)	4.475	4.475	4.476	4.475	4.475	4.475	4.473	4.472	4.473	4.472	4.473	4.473	4.474
Horizontal Stress (kPa)	486.3	486.3	486.4	486.3	486.3	486.3	486.1	486.0	486.1	486.0	486.1	486.1	486.2
Load-Area Factor	0.65	0.65	0.65	0.65	0.66	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65
Horizontal Deformation (µm)	4.69	4.69	4.69	4.69	4.69	4.69	4.73	4.73	4.73	4.73	4.73	4.73	4.71
Load Rise Time (ms)	123	123	123	123	122	123	125	125	125	125	125	125	124
Measured Stiffness (MPa)	10399	10356	10382	10348	10373	10372	10290	10316	10298	10341	10301	10309	10340
Adjusted Stiffness Modulus (MPa)	10776	10730	10756	10721	10788	10754	10675	10706	10683	10728	10687	10696	10725

Data File: EP07_1.tdms

Notes: Record details about the specimen in this area:

Bulk Density:
 Poisson's Ratio:
 Description of asphaltic material:
 How it was mixed:
 How it was compacted:
 How bulk density was determined:
 How the specimen was stored:

Signed:

Date:

cooper

BSD-1%F

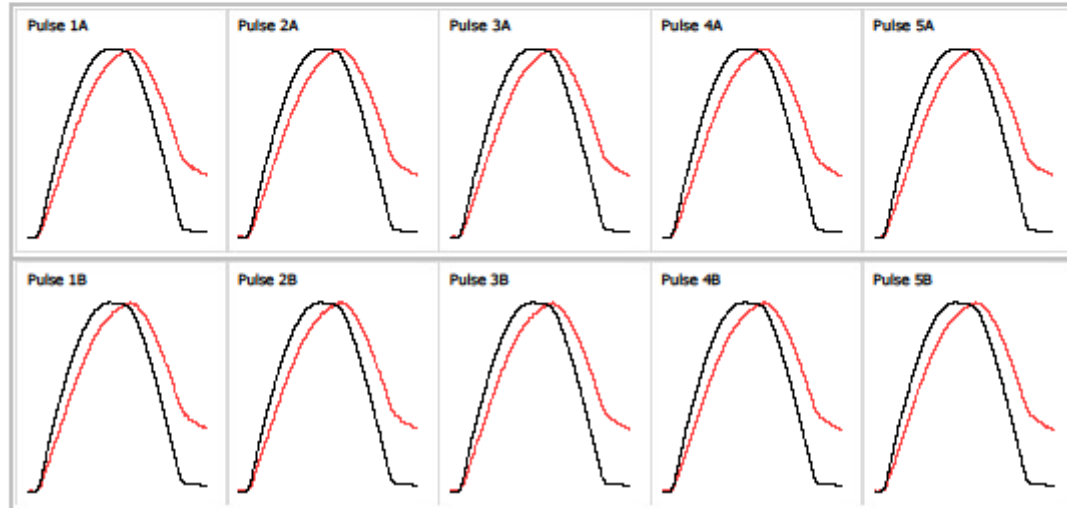
Stiffness Modulus: EN 12697-26: Annex C, April 2005

Date of Test: 21 May 2025 @ 12:48
 Report Number:
 Operator: AHMED BEN SEDDIK
 Specimen ID: EP08
 Client Name:

Lab Address: LTP Sud

Test Temperature (°C)	15
Bulk Density (kg/m ³)	2396
Diameter (mm)	101
Thickness (mm)	60

Conditioning Pulses	10
Poissons Ratio	0.35
A & B Target Rise Time (ms)	124
A & B Target Deformation (µm)	5



Test Results

	1A	2A	3A	4A	5A	Mean A	1B	2B	3B	4B	5B	Mean B	Mean A&B
Load Peak to Peak (kN)	4.108	4.107	4.106	4.106	4.106	4.107	4.066	4.068	4.068	4.064	4.063	4.066	4.086
Horizontal Stress (kPa)	431.5	431.4	431.4	431.4	431.4	431.4	427.1	427.3	427.4	426.9	426.9	427.1	429.3
Load-Area Factor	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.66	0.66	0.66	0.66	0.66	0.66	0.66
Horizontal Deformation (µm)	4.84	4.84	4.84	4.84	4.84	4.84	4.78	4.78	4.78	4.78	4.78	4.78	4.81
Load Rise Time (ms)	124	124	124	124	124	124	124	124	124	124	124	124	124
Measured Stiffness (MPa)	8947	8953	8932	8938	8925	8939	8961	8972	8922	8951	8963	8954	8946
Adjusted Stiffness Modulus (MPa)	9274	9281	9260	9267	9253	9267	9316	9325	9273	9307	9322	9309	9288

Data File: EP08_1.tdms

Notes: Record details about the specimen in this area:

Bulk Density:
 Poisson's Ratio:
 Description of asphaltic material:
 How it was mixed:
 How it was compacted:
 How bulk density was determined:
 How the specimen was stored:

Signed:

Date:

cooper

Tableau A 2. 1: Résultats de l'analyse granulométrique des agrégats.

Ouverture (mm)	Tamisat (%) 8/15	Tamisat (%) 3/8	Tamisat (%) 0/3
16	98	100	100
12.5	67	100	100
10	34	100	100
8	13	92	100
6.3	3	56	100
5	1	23	100
4	1	8	100
3.15	1	3	95
2.5	0	1	85
2	0	1	76
1.25	0	0	62
1	0	0	54
0.63	0	0	46
0.5	0	0	42
0.4	0	0	40
0.315	0	0	37
0.250	0	0	31
0.2	0	0	27
0.16	0	0	25
0.125	0	0	20
0.08	0	0	20

Tableau A2. 2 : Résultats de l'analyse
Granulométrique de sable de Dun.

Ouverture (mm)	Tamisat (%) SD
0.63	100
0.315	91
0.16	59
0.08	2

Tableau A 2. 10: Résultats expérimentale du bitume 40/50.

Essai	Condition	Bitume	Norme	Norme de référence	Observation
Pénétration	1/10mm 25 C	43.33	40 à 50	NF T 66-004	Conformé la norme
Point de ramollissement	C°	51	47 à 60	NF T 66-008	
Densité	Relative à 25C°	1.032	1,00 à 1,10	NF T 66-007	

Tableau A3. 7 : Granulométrie du mélange proposé.

Tamis	Fillers	Gravier 3/8	Gravier 8/15	Sable	Mélange proposé
16	0	22	34.3	43	99
14	0	22	30.62	43	96
12.5	0	22	23.45	43	88
10	0	22	11.90	43	77
8	0	20.24	4.55	43	68
6.3	0	12.32	1.05	43	56
5	0	5.06	0.35	43	48
4	0	1.76	0.35	43	45
3.15	0	0.66	0.35	41	42
2.5	0	0.22	0.41	37	38
2	0	0.22	0.41	33	37
0.63	0	0.8	0.41	20	21
0.315	0	0.8	0.41	16	17
0.16	0	0.8	0.41	11	12

Tamis	tamisat	Fuseau	
14	99	94	100
10	77	72	84
6,3	56	50	66
4	45	40	54
2	34	28	40
0,315	17	11	18
0,08	9	7	10

Tamis	Fractions				Mélange proposé
	Fillers	Sable 0/3	Gravier 3/8	Gravier 8/15	
31,5	2	41	22	35	100,00
25	2	41	22	35	100,00
20	2	41	22	35	100,00
16	2	41	22	34	99,00
12,5	2	41	22	23	88,00
10	2	41	22	12	77,00
8	2	41	20	5	68,00
6,3	2	41	12	1,05	56,00
5	2	41	5	0,35	48,00
4	2	41	1,80	0,35	45,00
3,15	2	39	0,70	0,35	42,00
2,5	2	35	0,22	0,41	38,00
2	2	31	0,22	0,41	34,00
0,63	2	19	0,80	0,41	22,00
0,315	2	15	0,80	0,41	18,21
0,16	2	10	0,80	0,41	13,21
0,08	2	8,0	0,80	0,41	11,21